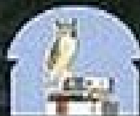
KLASYCY NAUKI



Erwin Schrödinger

CZYM JEST ŻYCIE?

oraz

UMYSŁ I MATERIA

SZKICE AUTOBIOGRAFICZNE

Prószyński i S-ka

W serii ukazały się:

David L. Goodstein, Judith R. Goodstein: *Zaginiony wykład Feynmana*
Albert Einstein: *Teoria względności i inne eseje*
Hermann Weyl: *Symetria*
Michael Faraday: *Dzieje świecy*
Albert Einstein: *Istota teorii względności*
G. H. Hardy: *Apologia matematyka*
Steven Weinberg: *Pierwsze trzy minuty*
Albert Einstein, Leopold Infeld: *Ewolucja fizyki*

W przygotowaniu:

Karol Darwin: *Listy*
Thomas S. Kuhn: *Przewrót kopernikański*
S. Chandrasekhar: *Prawda i piękno*

Erwin Schrödinger

CZYM JEST ŻYCIE?

Fizyczne aspekty żywej komórki

UMYSŁ I MATERIA

SZKICE AUTOBIOGRAFICZNE

Z przedmową
Rogera Penrose'a

Przełożył
Stefan Amsterdamski

Prószyński i S-ka

Warszawa 1998

Tytuł oryginału angielskiego
WHAT IS LIFE?
The Physical Aspect of the Living Cell
with MIND AND MATTER
and AUTOBIOGRAPHICAL SKETCHES

Published by arrangement with the Press Syndicate
of the University of Cambridge
What is Life? and *Mind and Matter*

Canto edition with *Autobiographical Sketches*
and Foreword to *What is Life?* by Roger Penrose

Projekt okładki
Katarzyna A. Jarnuszkiewicz
Michał Korwin-Kossakowski

Rysunki na podstawie wydania angielskiego
Krzysztof Białkowski

ISBN 83-7180-759-7

Wydawca
Prószyński i S-ka SA
ul. Garażowa 7
02-651 Warszawa

Druk i oprawa
Łódzka Drukarnia Dziełowa SA
ul. Rewolucji 1905 r. nr 45
90-215 Łódź

Spis rzeczy

CZYM JEST ŻYCIE?

FIZYCZNE ASPEKTY ŻYWEJ KOMÓRKI

Na podstawie wykładów wygłoszonych w lutym 1943 roku pod auspicjami Dublin Institute for Advanced Studies, Trinity College

Pamięci moich rodziców

Przedmowa

Kiedy w latach pięćdziesiątych byłem młodym studentem matematyki, nie czytywałem wiele, a jeśli już (zwłaszcza gdy kończyłem rozpoczętą książkę), zazwyczaj były to prace Schrödingera. Ekscytowała mnie zawsze ich odkrywczość. Pomagały one zrozumieć nowe zjawiska tajemniczego świata, w którym żyjemy. Pracą najbardziej zasługującą na taką ocenę jest krótka, klasyczna już książeczka *Czym jest życie?*, która, jak dziś sądzę, powinna zostać zaliczona do najbardziej znaczących prac naukowych napisanych w naszym stuleciu. Zawiera próbę zrozumienia niektórych tajemnic życia, próbę podjętą przez fizyka, który tak bardzo przyczynił się do zmiany rozumienia budowy świata. Interdyscyplinarne podejście do zagadnienia było wówczas czymś wyjątkowym, a mimo to książka napisana jest z przesadną, niekiedy rozbrajającą skromnością, w sposób przystępny dla laików oraz młodych ludzi myślących o karierze naukowej. I rzeczywiście, liczni uczeni, którzy dokonali fundamentalnych odkryć w dziedzinie biologii – między innymi J. B. S. Haldane i Francis Crick – przyznawali, że choć nie we wszystkim zgadzali się ze Schrödingerem, książka jego, dzięki szerokości spojrzenia i niezwykłej oryginalności myśli tego wybitnego fizyka, wywarła na nich ogromny wpływ.

Jak wiele prac, które znacząco ukształtowały ludzkie myślenie, również i ta formułuje twierdzenia, które, gdy tylko je pojmiemy, wydają się prawdami niemal oczywistymi. Mimo to ignorowane są one przez zaskakująco dużą liczbę ludzi przekonanych, że wiedzą lepiej. Jakże często wciąż jeszcze słyszymy, że zjawiska kwantowe nie mają większego znaczenia w ba-

daniach biologicznych, albo że odżywiamy się, aby „zyskać energię". Podkreśla to dobitnie znaczenie, jakie dziś jeszcze ma *Czym jest życie?* Schrödingera. Książka na pewno warta jest lektury!

Roger Penrose
8 sierpnia 1991 roku

Wstęp

Od uczonego oczekuje się głębokiej i kompletnej wiedzy z pierwszej ręki na określony temat, i dlatego ludzie spodziewają się, że nie będzie się on wypowiadał w kwestiach, w których nie jest specjalistą. *Noblesse oblige*. W tym jednak przypadku zamierzam zrezygnować z ewentualnej *noblesse* i uwolnić się od płynącej z niej obligacji. Oto wyjaśnienie tej decyzji:

Odziedziczyliśmy od poprzedników tęsknotę za spójną wiedzą o świecie. Już sama nazwa instytucji „wyższego kształcenia" przypomina, że od dawnych czasów najwyższym zaufaniem cieszyły się teorie o zasięgu uniwersalnym. Jednakże szybki postęp wiedzy w ostatnim stuleciu – zarówno wszerz, jak i w głąb – stawia nas wobec dylematu. Zdajemy sobie wyraźnie sprawę, że dopiero teraz zaczynamy zdobywać niezbędne dane, pozwalające połączyć wszystko, co wiemy, w jedną całość. Jednocześnie jednak niemożliwością stało się niemal, by umysł jednostki ogarnął więcej niż niewielki jej, wyspecjalizowany fragment.

Nie widzę innego sposobu uniknięcia tego dylematu (chyba że mielibyśmy w ogóle zrezygnować z naszego celu) jak ten, że przynajmniej niektórzy z nas próbować będą syntezy faktów i teorii na podstawie wiedzy z drugiej ręki, nawet gdyby związane z tym było ryzyko ośmieszenia się.

Tyle słów wyjaśnienia.

Kłopoty językowe są nie do pominięcia. Język ojczysty jest jak dobrze skrojony garnitur. Nigdy nie czujemy się całkiem swobodnie, gdy musimy zastąpić go cudzym. Winien jestem podziękowanie profesorowi Inksterowi (Trinity College, Dublin), Padraigowi Browne'owi (St. Patrick's College, Maynooth),

a przede wszystkim S. C. Robertsowi. Mieli wielkie kłopoty z dopasowaniem mi „nowego garnituru", tym większe, że zmuszony do rezygnacji z kroju, do którego przywykłem, stawiałem opór. Jeśli mimo starań mych przyjaciół ostało się coś ze starego szyku, mnie tylko winić za to należy.

Tytuły poszczególnych paragrafów miały pełnić rolę podsumowań, a każdy rozdział powinno się czytać *in continuo*.

E. S.
Dublin
wrzesień 1944

Homo liber nulla de re minus quam de morte cogitat; et ejus sapientia non mortis sed vitae mediatio est.

Człowiek wolny o niczym nie myśli mniej niż o śmierci, a mądrość jego jest rozmyślaniem nie o śmierci, lecz o życiu.

Baruch Spinoza: *Etyka* (przełożył Ignacy Myślicki)

1

Ujęcie zagadnienia na gruncie fizyki klasycznej

Cogito ergo sum

– Descartes

Ogólny charakter i cel dociekań

Książeczka ta zrodziła się z publicznych wykładów wygłoszonych przez fizyka teoretyka dla około czterystu wytrwałych, jak się okazało, słuchaczy, których z góry uprzedziłem, że temat jest trudny i że choć nie będę korzystał z wywodów matematycznych, niełatwo będzie te prelekcje nazwać popularnymi. I rzecz nie w tym, że przedmiot był tak prosty, iż mogłem się obejść bez wzorów. Przeciwnie, był zbyt skomplikowany, aby w pełni dawał się ująć matematycznie. Złudzenie „popularności" sprawiał też mój zamiar jasnego wyłożenia fizykom i biologom jednej zasadniczej idei dotyczącej zarówno fizyki, jak i biologii.

Istotnie bowiem, mimo iż temat zmusza do poruszania różnych kwestii, całe przedsięwzięcie ma na celu przekazanie jednej tylko idei, będącej przyczynkiem do rozważań nad ważnym i rozległym problemem. Aby nie pogubić się w szczegółach, celowe będzie krótkie przedstawienie planu całości.

Ten ważny i rozległy problem sformułować można następująco: jak fizyka i chemia wyjaśnić mogą wydarzenia zachodzące w czasie i w przestrzeni, odbywające się wewnątrz żywego organizmu?

Wstępna odpowiedź na to pytanie, jaką spróbuję przedstawić i uzasadnić w tej książeczce, sprowadza się do twierdzenia, że chociaż faktycznie dzisiejsza fizyka i chemia nie potrafią

wyjaśnić takich zdarzeń, nie jest to powód, by sądzić, że nie zdołają tego kiedyś uczynić.

Fizyka statystyczna. Zasadnicza odmienność struktur

Pogląd ten byłby zgoła trywialny, gdyby miał jedynie na celu podtrzymywanie nadziei, iż to, co nie udało się dotąd, uda się w przyszłości. Chodzi mi zdecydowanie o coś więcej, mianowicie o wskazanie przyczyn dotychczasowych niepowodzeń.

Dziś, dzięki pomysłowym badaniom biologów, a zwłaszcza genetyków, prowadzonym w ciągu ostatnich trzydziestu–czterdziestu lat, wystarczająco wiele wiemy już o materialnej strukturze organizmów i ich funkcjonowaniu, by nie tylko stwierdzić, że współczesna fizyka i chemia nie potrafią wyjaśnić tego, co się dzieje w żywych organizmach, lecz również powiedzieć, dlaczego obie nauki są do tego niezdolne.

Układy atomów w najważniejszych częściach żywego organizmu oraz ich wzajemne oddziaływania różnią się w sposób zasadniczy od tych układów atomów, które stały się przedmiotem empirycznych i teoretycznych badań fizyków i chemików. Jednakże różnica, którą nazwałem zasadniczą, jest tego rodzaju, że łatwo może się wydać mało ważna każdemu z wyjątkiem fizyka, który dobrze wie, że prawa fizyki i chemii mają charakter statystyczny.[1] To właśnie ze względu na statystyczny punkt widzenia struktura owych części organizmów żywych różni się tak zasadniczo od struktury dowolnego obiektu materialnego, jaki fizycy i chemicy badali dotąd empirycznie w swych laboratoriach lub rozważali teoretycznie w swych gabinetach.[2] Jest rzeczą nie do pomyślenia, by prawa i regularności tak odkryte mogły stosować się bezpośrednio do

[1] Twierdzenie to wydać się może zbyt ogólne, ale jego uzasadnienie musimy odłożyć na później (patrz str. 99–102).

[2] Ten punkt widzenia przedstawiony został dobitnie w dwóch wielce inspirujących artykułach F. G. Donnana: La science physico-chimique décrit-elle d'une

zachowań układów o strukturze odmiennej od tej, jaka stanowi podłoże tych praw.

Od kogoś, kto nie jest fizykiem, nie można się spodziewać, by uchwycił, czy choćby docenił, znaczenie wskazanej różnicy między strukturami, gdy przedstawia się ją w terminach tak abstrakcyjnych, jakich właśnie użyłem. By nadać temu twierdzeniu charakter bardziej konkretny, uprzedzę wyjaśnienie, które później podam, i powiem, że najistotniejszą część żywej komórki – włókno chromosomowe – nazwać można kryształem aperiodycznym. W fizyce natomiast mieliśmy dotąd do czynienia wyłącznie z kryształami periodycznymi. Dla skromnego umysłu fizyka te ostatnie są bardzo interesującymi i skomplikowanymi obiektami – jednymi z najbardziej fascynujących i złożonych nieożywionych struktur materialnych opierających się jego dociekliwości. Jednakże w porównaniu z kryształami aperiodycznymi są one raczej niewyszukane i nieciekawe. Różnica między nimi jest z grubsza taka, jak między zwykłą tapetą o powtarzalnym wzorze a arcydziełem sztuki zdobniczej, na przykład rafaelowskim gobelinem nie o regularnym i nudnym wzorze, lecz o spójnym, przemyślanym rysunku wielkiego mistrza.

Nazywając kryształ periodyczny jednym z najbardziej skomplikowanych przedmiotów badań, miałem na myśli zwykłego fizyka. Chemia organiczna natomiast, badając coraz to bardziej skomplikowane cząsteczki, zbliżyła się znacznie do owych „kryształów aperiodycznych", które, moim zdaniem, są materialnym nośnikiem życia. Toteż trudno się dziwić, że chemicy organicy przyczynili się już znacznie do rozwiązania problemu, podczas gdy fizycy nie uczynili w tej sprawie niemal nic.

Podejście naiwnego fizyka

Po tym bardzo krótkim przedstawieniu ogólnej idei, czy też raczej ostatecznego celu dociekań, wskażę główną „linię natarcia".

façon adéquate les phénomènes biologiques?, „Scientia" XXIV, nr 78, 1918, s. 10 oraz: The mystery of life, „Smithsonian Report for 1929" 1919, s. 309.

Chciałbym najpierw omówić naiwne, jakbyście je zapewne nazwali, podejście fizyka do organizmów żywych – to znaczy koncepcje, jakie na gruncie posiadanej przezeń wiedzy, a zwłaszcza statystycznego jej podłoża, zrodzić się mogą w jego głowie, gdy zaczyna myśleć o organizmach, ich zachowaniach i funkcjach, i gdy zadaje sobie pytanie, czy na tej podstawie, wychodząc z prostych i jasnych założeń swej dyscypliny, potrafi przyczynić się w istotny sposób do rozwiązania zagadnienia.

Jak się okaże – potrafi. Następnym krokiem musi być porównanie oczekiwań teoretycznych z faktami biologicznymi. Wówczas przekonamy się, że chociaż w zasadzie koncepcje fizyka wydają się rozsądne, to jednak wymagają zdecydowanych poprawek. W ten sposób stopniowo zbliżymy się do trafnego poglądu, czy też – mówiąc skromniej – do poglądu, który ja proponuję uznać za słuszny.

Nawet jeśli mam w tej kwestii rację, wcale nie jestem pewien, czy moje podejście jest najlepsze i najprostsze. Ale jest moje. To ja jestem owym „naiwnym fizykiem". I nie mogę przecież wskazać żadnej lepszej czy prostszej drogi do celu niż ta kręta ścieżka, którą sam kroczę.

Dlaczego atomy są tak małe?

Prezentację koncepcji naiwnego fizyka wygodnie jest zacząć od niemal niedorzecznego pytania: dlaczego atomy są tak małe? A rzeczywiście takie są. Każdy choćby najmniejszy przedmiot, z jakim mamy do czynienia na co dzień, składa się z ogromnej liczby atomów. Aby to uzmysłowić, odwoływano się do wielu przykładów, żaden jednak nie jest tak poglądowy jak ten podany przez Kelvina: załóżmy, że potrafilibyśmy jakoś oznakować cząsteczki zawarte w szklance wody; gdybyśmy następnie wylali jej zawartość do oceanu, poczekali aż dojdzie do pełnego wymieszania z wodą w oceanie i zaczerpnęli z tego znów szklankę wody, to po-

winno się w niej znaleźć około stu oznakowanych cząsteczek.[3]

Rzeczywisty rozmiar atomów[4] leży w przedziale od 1/5000 do 1/2000 długości fali światła żółtego. Porównanie jest znaczące, albowiem długość fali świetlnej wskazuje z grubsza rozmiary najmniejszych drobin, jakie dadzą się rozróżnić w mikroskopie. Okaże się zatem, że taka drobina składa się z miliardów atomów.

Dlaczego więc atomy są tak małe?

Pytanie to jest zwodnicze. W istocie nie chodzi w nim bowiem o wielkość atomów, lecz o wielkość organizmów, zwłaszcza naszych, ludzkich. Atomy okazują się istotnie bardzo małe, gdy do ich pomiaru stosujemy codzienne miary długości – jard lub metr. W fizyce atomowej zwykło się stosować w tym celu jednostkę zwaną angstremem (Å) – $1/10^{10}$ część metra, czyli – w zapisie dziesiętnym – 0,000 000 0001 m. Średnice atomów są rzędu 1–2 Å. Otóż nasze potoczne miary długości (ze względu na które atomy wydają się tak małe) narzucone są przez rozmiary naszego ciała. Ponoć jard jako miarę długości ustanowił pewien angielski król: zapytany przez doradców, jaką należałoby przyjąć jednostkę, rozłożył szeroko ręce i powiedział: będzie dobrze, jeśli weźmiecie odległość od środka klatki piersiowej do czubka palców. Opowieść ta, mniejsza o to czy prawdziwa, jest pouczająca. Król, co zrozumiałe, wskazał długość porównywalną z rozmiarami własnego ciała, wiedząc, że każda inna byłaby niedogodna. Fizyk atomowy, przy całym

[3] Oczywiście, nie byłoby ich dokładnie 100, lecz może 88, 95, 107 albo 112. Jest jednak bardzo mało prawdopodobne, by było ich 50 albo 150. Odchylenie (wahania) od stu powinno być rzędu pierwiastka kwadratowego ze 100, czyli 10. Uwagę tę możemy na razie pominąć, ale wrócimy do niej, podając przykład zastosowania statystycznej reguły $\sqrt{n}$.

[4] Zgodnie z dzisiejszymi poglądami atomy nie mają ostro określonych granic, a tym samym określenie „rozmiar atomu" nie jest pojęciem ścisłym. Można je jednak dookreślić, lub jeśli kto woli, zastąpić przez odległość między ich środkami w ciele stałym lub w cieczy, lecz, oczywiście, nie w stanie gazowym. Odległość ta w normalnych warunkach ciśnienia i temperatury jest z grubsza dziesięć razy większa.

swoim upodobaniu dla angstrema, też woli, by mu powiedziano, że na nowy garnitur potrzebuje trzy i pół metra, a nie 35 miliardów angstremów tweedu.

Tak więc okazuje się, że w naszym pytaniu chodzi o stosunek do siebie dwóch wielkości – naszego ciała i atomu. Skoro uznajemy obiektywne istnienie atomów za niewątpliwe, nasze pytanie brzmi: dlaczego nasze ciała muszą być o tyle większe od atomów?

Przypuszczam, że niejeden ze zdolnych fizyków czy chemików żałował, iż żaden z naszych zmysłów, składający się z niezliczonych atomów, nie jest na tyle wrażliwy, by reagować na oddziaływanie pojedynczego atomu. Nie potrafimy dostrzegać, czuć lub słyszeć pojedynczych atomów. Hipotezy ich dotyczące nie dają się konfrontować z bezpośrednimi danymi pochodzącymi od naszych zmysłów i nie dają się bezpośrednio sprawdzać.

Czy tak być musi? Czy są po temu jakieś istotne powody? Czy możemy ten stan rzeczy wyprowadzić z jakiejś pierwszej zasady i twierdzić, że żaden inny nie byłby zgodny z prawami natury? Tu przynajmniej mamy do czynienia z problemem, który fizyk może definitywnie wyjaśnić. Odpowiedź na wszystkie te pytania brzmi twierdząco.

Funkcjonowanie organizmu wymaga ścisłych praw fizycznych

Jakże koszmarne byłoby życie, gdyby sprawy miały się inaczej, to jest gdyby pojedyncze atomy, czy choćby cząsteczki złożone z nielicznych atomów, mogły odczuwalnie oddziaływać na nasze zmysły. Zwróćmy uwagę na jedną tylko kwestię: taki organizm byłby raczej niezdolny do uporządkowanego myślenia, które, po wielu krokach pośrednich, doprowadziło ostatecznie do utworzenia – między wieloma innymi – pojęcia atomu.

Aczkolwiek wybraliśmy ten przykład, poniższe rozważania odnosić się będą również do funkcjonowania innych narządów, a nie tylko mózgu i systemu zmysłów. Atoli, tym jedynym w nas samych, co nas naprawdę intryguje, jest fakt, że odczuwamy, myślimy i postrzegamy. Z ludzkiego, o ile już nie

z obiektywnego, biologicznego punktu widzenia, wszystkie procesy odmienne od fizjologicznych, odpowiedzialnych za myślenie i postrzeganie, są drugorzędne i grają pomocniczą rolę. Co więcej, nasze dociekania byłyby o wiele łatwiejsze, gdybyśmy przedmiotem badania uczynili proces, któremu ściśle towarzyszą zdarzenia zachodzące w świadomości, i to pomimo tego, że istota tego paralelizmu pozostaje nieznana. *Nota bene*, moim zdaniem wyjaśnienie tego paralelizmu wykracza poza możliwości nauk przyrodniczych, a być może i wszelkiego ludzkiego poznania.

Stoimy więc przed następującym problemem: dlaczego tego rodzaju narząd jak nasz mózg, wraz ze związanym z nim aparatem zmysłowym, po to by jego zmienne stany ściśle odpowiadały wysoko rozwiniętemu myśleniu, składać się musi nieuchronnie z ogromnej liczby atomów? Dlaczego narząd ten nie mógłby spełniać swych zadań, gdyby jako całość, lub w jakichś swych peryferyjnych częściach podlegających bezpośrednio bodźcom otoczenia, był mechanizmem na tyle czułym, aby reagować na zewnętrzne oddziaływanie pojedynczego atomu i rejestrować je?

Otóż jest tak dlatego, że to, co nazywamy myśleniem, jest (1) czymś uporządkowanym i (2) dotyczyć może tylko materiału, tj. percepcji i doświadczeń, które same są w jakimś przynajmniej stopniu uporządkowane. Płyną z tego dwie konsekwencje. Po pierwsze, aby między jakimś układem fizycznym a myśleniem (na przykład między moim mózgiem i moim myśleniem) zachodziła wzajemna odpowiedniość, układ ten musi być strukturą wysoce uporządkowaną. Znaczy to, że zachodzące w nim zdarzenia podlegać muszą ścisłym prawom fizycznym, przynajmniej z dobrym przybliżeniem. Po drugie, skutki wywoływane w takim wysoce zorganizowanym układzie przez inne ciała zewnętrzne odpowiadać muszą percepcjom i doświadczeniom będącym, jak powiedziałem, materiałem naszego myślenia. Toteż fizyczne oddziaływania między układem, jakim jesteśmy, a otoczeniem również odznaczać się muszą wysokim stopniem fizycznego uporządkowania, czyli podlegać z pewną dokładnością ścisłym prawom fizycznym.

Podłożem praw fizyki są statystyczne procesy atomowe, toteż prawa te mogą być tylko przybliżone

Dlaczego wszystko to byłoby niemożliwe w przypadku organizmu złożonego z niewielkiej tylko liczby atomów i wrażliwego już na ich pojedyncze oddziaływania?

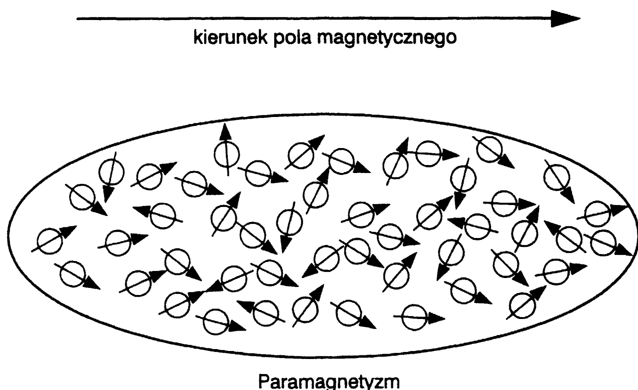
Otóż wiemy, że każdy pojedynczy atom porusza się nieustannie w sposób całkowicie bezładny, co nie pozwala na zachowanie uporządkowane i wyklucza, by zdarzenia zachodzące w układzie składającym się z niewielkiej liczby atomów podlegały jakimiś rozpoznawalnym prawom. Prawa statystyczne zaczynają stosować się dopiero do ogromnej liczby atomów, a układy z nich złożone tym dokładniej się do nich stosują, im z większej liczby atomów się składają. W ten właśnie sposób zdarzenia stają się rzeczywiście uporządkowane. Wszystkie prawa fizyki i chemii, o których wiadomo, że odgrywają ważną rolę w procesach życiowych organizmów, mają charakter statystyczny. Nieustanny ruch cieplny atomów narusza wszelką inną, dającą się pomyśleć prawidłowość czy regularność.

Ich ścisłość wynika z dużej liczby atomów biorących udział w procesach. Pierwszy przykład – paramagnetyzm

Spróbuję to zilustrować na kilku przykładach wybranych na chybił trafił spośród tysięcy możliwych. Być może Czytelnik, który po raz pierwszy ma do czynienia z takimi zjawiskami, uzna, że zostały one nie najlepiej dobrane. W nowoczesnej fi-

zyce i chemii mają jednak naprawdę równie fundamentalne znaczenie, co w biologii na przykład ten fakt, iż organizmy żywe składają się z komórek, w astronomii - że istnieje prawo Newtona, w matematyce zaś - że istnieje ciąg liczb całkowitych 1, 2, 3, 4, 5... Na podstawie poniższego krótkiego omówienia zupełny laik nie uzyska jednak pełnego zrozumienia zagadnienia, którym zajmowali się tak wielcy fizycy, jak Ludwig Boltzmann czy Willard Gibbs, a omawianego w fachowych podręcznikach w rozdziałach poświęconych statystycznej termodynamice.

Jeśli długą, wypełnioną tlenem rurę z kwarcu umieści się w polu magnetycznym, gaz ulega namagnesowaniu[5]: cząsteczki tlenu stają się małymi magnesami i, tak jak igła magnetyczna, układają się równolegle do pola. Nie należy wszakże sądzić, że wszystkie zachowują się identycznie. Jeśli bowiem podwoimy natężenie pola, podwojeniu ulegnie też stopień namagnesowania cząsteczek tlenu, a zależność ta utrzymywać się będzie wraz z dalszym wzrostem natężenia pola.



Ryc. 1. Paramagnetyzm

[5] Przypadek gazu jest prostszy niż cieczy lub ciała stałego; fakt zaś, że namagnesowanie w przypadku gazu jest bardzo słabe, nie ma znaczenia z ważnego tu dla nas teoretycznego punktu widzenia.

Jest to szczególnie dobitny przykład prawa czysto statystycznego. Nieuporządkowany ruch cieplny cząsteczek gazu przeciwstawia się uporządkowaniu, jakie narzuca pole magnetyczne. Rezultatem jest tylko nieznaczna przewaga dipoli (cząsteczek namagnesowanych) ułożonych pod kątem ostrym do wektora sił pola, w porównaniu z liczbą cząsteczek ułożonych pod kątem rozwartym. Chociaż każda cząsteczka nieustannie zmienia swe położenie, to – ze względu na ich ogromną liczbę – zachowuje się niewielka przewaga uporządkowania zgodnego z kierunkiem pola i proporcjonalnego do jego natężenia. Pomysłowe to wyjaśnienie zawdzięczamy fizykowi francuskiemu P. Langevinowi.

O jego trafności przekonać się można następująco: jeśli rzeczywiście słabe namagnesowanie jest rezultatem przeciwstawnych tendencji, działania pola i ruchu cieplnego, to powinno się okazać, że można zwiększyć namagnesowanie cząsteczek, osłabiając ich ruch cieplny – czyli zamiast zwiększać natężenie pola, obniżając temperaturę. Otóż doświadczenie potwierdza, że poziom namagnesowania cząsteczek jest odwrotnie proporcjonalny do temperatury, co zgodne jest z teorią (tzw. prawem Curie). Nowoczesne urządzenia pozwalają na takie obniżenie temperatury, że ruch cieplny niemal w ogóle ustaje, a pole magnetyczne powoduje prawie całkowite namagnesowanie cząsteczek i ułożenie z grubsza wszystkich zgodnie z kierunkiem pola. W tych warunkach nie oczekujemy już, że dalsze zwiększanie natężenia pola spowoduje proporcjonalny wzrost stopnia namagnesowania; wzrastać ono będzie teraz powoli, aż osiągnie tzw. poziom nasycenia. Doświadczenie potwierdza ilościowo również i to oczekiwanie.

Zauważmy, że warunkowane to jest wyłącznie przez ogromną liczbę cząsteczek, które wszystkie razem wywołują obserwowane zjawisko namagnesowania. Gdyby cząsteczek było niewiele, namagnesowanie nie byłoby w ogóle stałe, lecz wskutek fluktuacji zmieniałoby się co chwila w rezultacie współzawodnictwa ruchu cieplnego i sił pola magnetycznego.

Drugi przykład – ruchy Browna, dyfuzja

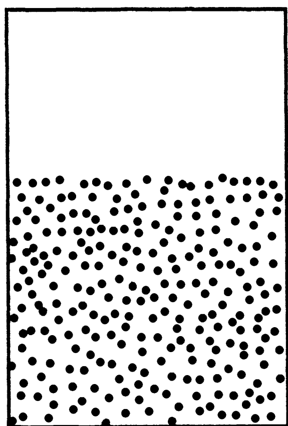
Jeśli wypełnimy dolną część zamkniętego szklanego naczynia parą składającą się z drobniutkich kropelek, to stwierdzimy, że górna granica pary obniża się z określoną prędkością, zależną od lepkości powietrza oraz rozmiaru i ciężaru właściwego kropelek. Jeśli jednak obserwować pod mikroskopem ruch pojedynczej kropelki, to widać, że nie opada ona nieustannie ze stałą prędkością, lecz porusza się tzw. ruchami Browna w różnych kierunkach; regularne opadanie jest średnią wypadkową takiego bezładnego ruchu.

Krople, choć nie są atomami, są jednak dostatecznie małe, aby nie być całkiem niewrażliwe na uderzenia pojedynczych cząsteczek w ich powierzchnię. Uderzane z różnych stron, w ostatecznym rachunku poddają się działaniu siły ciążenia.

Przykłady te wskazują, jak dziwne i chaotyczne byłyby nasze doznania, gdyby narządy zmysłów pozostawały wrażliwe na oddziaływania niewielkiej liczby cząsteczek. Istnieją wszakże bakterie i inne organizmy tak małe, że podlegają tego rodzaju oddziaływaniom. Ich ruchy zależne są od ruchów cieplnych cząstek otaczającego ośrodka. Gdyby zdolne były do ruchu samoczynnego, mogłyby - choć z trudnością - przemieszczać się z miejsca na miejsce wbrew ruchom cieplnym rzucającym nimi to w jedną, to w drugą stronę, niczym łódką na wzburzonym morzu.

Zjawiskiem bardzo podobnym do ruchów Browna jest dyfuzja.

Wyobraźmy sobie naczynie wypełnione cieczą, powiedzmy wodą, do której dodano niewielką ilość barwnej, rozpuszczalnej substancji, na przykład nadmanganianu potasu; początkowo stężenie nadmanganianu nie będzie jednorodne, lecz takie jak na ryc. 4, na którym kropki reprezentują cząsteczki nadmanganianu. Jak widać, jego stężenie maleje z lewa na prawo. Z biegiem czasu w układzie przebiegać będzie proces dyfuzji,



Ryc. 2. Opadające krople pary



Ryc. 3. Ruchy Browna opadającej kropli

to jest przemieszczania się cząsteczek nadmanganianu od lewej ku prawej, z obszarów o większym do obszarów o mniejszym stężeniu, aż stężenie w całej objętości roztworu wyrówna się.

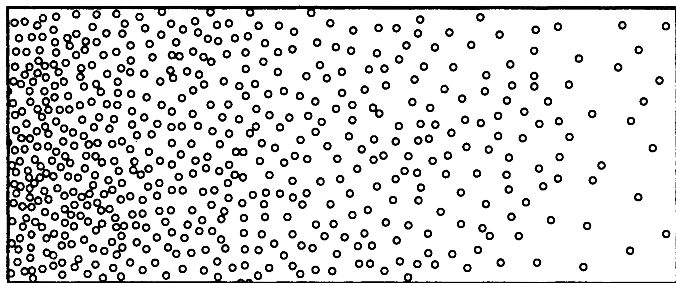
W omawianym, nieskomplikowanym i pozornie mało interesującym procesie godne uwagi jest to, iż jego efekt, wbrew naiwnym opiniom, nie jest rezultatem działania żadnej siły czy też tendencji do przemieszczania się cząsteczek nadmanganianu z obszarów bardziej do mniej zagęszczonych, jak to bywa z ludźmi unikającymi tłoku. Z naszymi cząsteczkami nadmanganianu nie dzieje się nic podobnego. Zachowanie każdej z oddzielna jest zupełnie niezależne od zachowań pozostałych, z którymi zderzają się rzadko. Los każdej natomiast, czy to

w obszarze zatłoczonym, czy nie wypełnionym nimi, jest rezultatem zderzeń z cząsteczkami wody, skutkiem czego każda cząsteczka nadmanganianu porusza się w nieprzewidywalnych kierunkach: czasem w kierunku obszaru bardziej zatłoczonego, czasem – mniej, lub też skośnie. Ruchy takie porównywano często z błądzeniem ślepca spacerującego bez żadnego celu, zmieniającego nieustannie kierunek swej marszruty.

Na pierwszy rzut oka, ale tylko na pierwszy, trudno zrozumieć, dlaczego ten bezładny ruch cząsteczek nadmanganianu powoduje ich kierowanie się ku obszarom mniejszego stężenia i ostatecznie prowadzi do wyrównania stężenia roztworu. Otóż, jeśli wyobrazimy sobie (jak na ryc. 4) cienką warstewkę cieczy o mniej więcej stałym stężeniu, to znajdujące się w niej cząsteczki nadmanganianu będą z równym prawdopodobieństwem przemieszczać się w danej chwili tak na lewo, jak na prawo. Jednakże w wyniku tego przez płaszczyznę na granicy dwóch sąsiednich warstw więcej cząsteczek przemieszczać się będzie z lewa na prawo niż w odwrotnym kierunku, a to po prostu dlatego, że po lewej stronie jest ich więcej. I proces ten będzie trwał tak długo, aż liczba cząsteczek z obu stron wyrówna się, czyli aż stężenie w całej objętości będzie jednakowe.

Gdybyśmy przełożyli to rozumowanie na język matematyki, to prawo dyfuzji przyjęłoby postać równania różniczkowego cząstkowego:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D\nabla^2\rho.$$



Ryc. 4. Dyfuzja (od lewej do prawej) w roztworze o zmiennym stężeniu

Nie będę zawracał głowy Czytelnikowi tłumaczeniem tego równania, choć jego sens daje się prosto wyrazić w języku potocznym.[6] Podaję tu surowe, „matematycznie ścisłe" prawo, aby podkreślić, że jego fizyczna dokładność jest nieuchronnie zagrożona w każdym poszczególnym zastosowaniu. Oparte na zdarzeniach czysto przypadkowych, ma ono tylko wartość przybliżoną. Jeśli jest bardzo dobrym przybliżeniem, jak ma to faktycznie miejsce, to jedynie dlatego, że w procesie tym uczestniczy ogromna liczba cząsteczek. Im jest ich mniej, tym większych przypadkowych odchyleń należy się spodziewać, co daje się stwierdzić w sprzyjających okolicznościach.

Trzeci przykład – granice dokładności pomiaru

Ostatni przykład, jaki podam, pokrewny jest poprzedniemu, lecz ma szczególne znaczenie. Lekkie ciało, zawieszone na długiej, cienkiej nici, pozostające w stanie równowagi, służy często fizykom do pomiaru słabych sił, zakłócających tę równowagę, na przykład sił magnetycznych, elektrycznych bądź grawitacyjnych, przyłożonych w taki sposób, by obracały owo ciało wokół jego osi pionowej. (Obiekt musi być oczywiście dobrany odpowiednio do badanego celu). Nieustanne wysiłki, zmierzające do udoskonalenia dokładności tego powszechnie stosowanego przyrządu, napotykały nader interesujące ograniczenia. Otóż, im obieraliśmy lżejsze ciało i cieńszą nić, aby przyrząd wrażliwy był na działanie coraz słabszych sił, tym łacniej docieraliśmy do granicy, po przekroczeniu której zawieszony obiekt wyraźnie ulegał wpływom ruchu cieplnego cząsteczek otaczającego środowiska i zaczynał wykonywać stały,

[6] Stężenie w dowolnym punkcie rośnie (lub maleje) w czasie proporcjonalnie do względnego nadmiaru (lub niedomiaru) stężenia w nieskończenie małym otoczeniu tego punktu. *Nota bene*, dokładnie tę samą postać matematyczną ma prawo przewodnictwa cieplnego, tyle że zamiast stężenia występuje w nim temperatura.

nieregularny taniec wokół położenia równowagi, podobny do drgań cząsteczek w naszym drugim przykładzie. Aczkolwiek zjawisko to nie wyznacza absolutnej granicy dokładności pomiaru, to jednak ogranicza ją praktycznie. Nie kontrolowane skutki ruchu cieplnego nakładają się na skutki mierzonych oddziaływań i powodują, że nie wiadomo już, o czym świadczy odchylenie od pozycji równowagi. Aby wyeliminować skutki ruchów Browna w otoczeniu, trzeba dokonywać wielokrotnych pomiarów. Przykład ten jest szczególnie pouczający dla naszych rozważań. Nasze narządy zmysłów też są pewnego rodzaju przyrządami: łatwo zrozumieć, że gdyby były nadmiernie wrażliwe, stałyby się bezużyteczne.

Reguła $\sqrt{n}$

Tyle przykładów. Dodam tylko, że nie ma takiego prawa fizyki lub chemii, dotyczącego tego, co się dzieje wewnątrz żywego organizmu lub w jego oddziaływaniach z otoczeniem, którego nie mógłbym wziąć za przykład. Konkretne wyjaśnienie mogłoby być bardziej skomplikowane, ale istota sprawy jest za każdym razem taka sama, toteż dalsze ich przytaczanie jest zbędne.

Powinienem jednak podać jedno bardzo ważne twierdzenie ilościowe, dotyczące stopnia niedokładności każdego prawa fizycznego, a mianowicie tak zwaną regułę $\sqrt{n}$. Najpierw zilustruję ją na prostym przykładzie, a następnie – uogólnię.

Jeśli powiadam, że jakiś gaz w określonych warunkach ciśnienia i temperatury ma określony ciężar właściwy i gdybym wyraził to, twierdząc, że określona objętość gazu w tych warunkach zawiera n cząsteczek, to nie ulega wątpliwości, że w wyniku sprawdzenia tego twierdzenia w jakiejś chwili, okazałoby się, że jest ono niedokładne, a odchylenie będzie rzędu $\sqrt{n}$. Gdyby $n = 100$, odchylenie byłoby rzędu 10, a więc względny błąd wynosiłby 10%. Jeśli jednak $n = 1\,000\,000$, to $\sqrt{n} = 1000$, a względny błąd wynosi 0,1%. Otóż z grubsza rzecz biorąc, jest to prawo statystyczne o znaczeniu ogólnym.

Względna niedokładność praw fizyki i chemii fizycznej wynosi $1/\sqrt{n}$, gdzie n oznacza liczbę cząsteczek biorących udział w wywołaniu, w określonym miejscu i czasie, zjawiska opisywanego przez prawo i sprawdzanego w określonym eksperymencie.

Świadczy to raz jeszcze, że aby organizm, zarówno w swych funkcjach wewnętrznych, jak oddziaływaniach ze światem zewnętrznym, podlegał ścisłym prawom, musi być odpowiednio duży. W przeciwnym bowiem razie liczba uczestniczących cząstek byłaby zbyt mała, a prawo nie sprawdzałoby się dość dokładnie. Chociaż milion jest, jak się zdaje, liczbą dość dużą, to zależność określona z dokładnością 1 do 1000 nie jest aż tak ścisła, by zasługiwała na miano prawa natury.

2

Mechanizm dziedziczenia

Byt jest czymś wiecznym, w prawach bowiem
Kryje się skarbów żywych mrowie,
Które ozdobą są Wszechświata.

Johann Wolfgang Goethe (przełożył Jacek St. Buras)

Przewidywania klasycznego fizyka, nie będąc bynajmniej trywialne, są błędne

Doszliśmy zatem do wniosku, że organizm i wszystkie biologicznie istotne procesy, jakim on podlega, jeśli nie mają być narażone na zbyt znaczące skutki zdarzeń przypadkowych, „jednoatomowych", muszą mieć podłoże w strukturach „wieloatomowych". Jest to, jak powiada nam „naiwny fizyk", niezbędny warunek, aby organizm podlegać mógł dostatecznie ścisłym prawom fizycznym, zapewniającym mu zadziwiająco regularne funkcjonowanie. Należy teraz zapytać, w jakiej mierze wniosek ten, uzyskany na podstawie rozważań czysto fizycznych, a więc *a priori* z punktu widzenia biologii, zgodny jest z faktami?

Na pierwszy rzut oka może się wydawać, że jest niemal trywialny. Biolog nawet sprzed trzydziestu, dajmy na to, lat mógłby powiedzieć, że chociaż w popularnym wykładzie celowe jest podkreślanie roli fizyki statystycznej w funkcjonowaniu organizmu, to w istocie jest to truizm. Nikt bowiem nie wątpi, że nie tylko każdy dorosły osobnik gatunków wyższych, lecz każda pojedyncza komórka składa się z „kosmicznej" liczby wszelkiego rodzaju atomów. W każdym konkretnym obserwo-

wanym procesie fizjologicznym, zachodzącym czy to wewnątrz komórki, czy też w jej oddziaływaniach z otoczeniem, uczestniczy, jak się sądzi, a raczej jak sądzono już trzydzieści lat temu, tak ogromna liczba atomów, że wszystkie wchodzące w grę prawa fizyki i chemii fizycznej spełniane być muszą z ogromną dokładnością, wyznaczoną przez prawo wielkich liczb, które ilustrowałem, omawiając regułę $\sqrt{n}$.

Dziś wiemy, że jest to pogląd błędny. Jak się przekonamy, niewiarygodnie małe grupy atomów, stanowczo zbyt małe, aby ściśle podlegały prawom statystycznym, odgrywają dominującą rolę w uporządkowanych procesach i zdarzeniach przebiegających w organizmie żywym. To one decydują o jego obserwowalnych cechach makroskopowych, jakie uzyskuje on w swym rozwoju osobniczym, oraz o jego funkcjonowaniu; a mimo to we wszystkim tym przejawiają się jak najbardziej ściśle prawa biologii.

Muszę zacząć od krótkiego omówienia obecnej sytuacji w biologii, zwłaszcza w genetyce. Zamierzam przedstawić stan wiedzy w dziedzinie, w której nie jestem specjalistą, w związku z czym proszę biologów o wyrozumiałość dla mego dyletantyzmu. Proszę jednocześnie o wybaczenie mi, że przedstawię panujące dziś poglądy w sposób nieco schematyczny. Nie można się bowiem spodziewać, by fizyk teoretyk zdolny był do kompetentnego przeglądu świadectw doświadczalnych, na które składają się, z jednej strony wielka liczba długotrwałych i pięknie współzależnych serii eksperymentów hodowlanych o niezrównanej pomysłowości, a z drugiej – niezwykle pomysłowe, możliwe dzięki najnowocześniejszym mikroskopom, bezpośrednie obserwacje żywej komórki.

Zakodowany scenariusz dziedziczenia (chromosomy)

Niech mi wolno będzie użyć wyrażenia „schemat organizmu" w tym rozumieniu, w jakim biolog mówi o „schemacie czterowymiarowym", mając na myśli nie tylko strukturę i funkcjono-

wanie organizmu w stadium dorosłym, czy jakimkolwiek innym, lecz całość jego rozwoju ontogenetycznego, od zapłodnionej komórki jajowej poczynając, po stadium dojrzałości, kiedy to organizm zaczyna się sam reprodukować. Otóż jak wiadomo, cały ten czterowymiarowy schemat zdeterminowany jest przez strukturę jednej komórki, zapłodnionego jaja. Wiemy nadto, że w istocie jest on zdeterminowany przez niewielką część tej komórki, a mianowicie – jej jądro. W normalnym „stanie spoczynku" jądro wygląda jak skłębiona masa nici chromatynowych.[1] Jednakże w życiowo ważnych procesach podziału (mitozie i mejozie, o których mowa będzie niżej) jądro wygląda tak, jakby składało się z nitkowatych lub pałeczkowatych zestawów cząstek zwanych chromosomami; bywa ich 8 lub 12, a w przypadku człowieka – jest 48.[2] Aby wyrażać się jak biolog, powinienem te liczby przedstawić raczej jako 2 × 4, 2 × 6, ..., 2 × 24... i mówić o podwójnym zestawie. Chociaż bowiem pojedyncze chromosomy dają się czasem wyraźnie odróżnić wedle ich kształtu i wielkości, to dwa zestawy są niemal całkowicie identyczne. Jak przekonamy się za moment, jeden pochodzi od matki (komórka jajowa), drugi zaś od ojca (zapładniający plemnik). To właśnie te chromosomy, czy też być może włóknista oś tego, co zazwyczaj widzimy pod mikroskopem jako chromosom, zawiera jakoś zakodowany scenariusz, plan całego przyszłego indywidualnego rozwoju organizmu i jego funkcjonowania w stadium dojrzałym. Każdy kompletny zestaw chromosomów zawiera pełny plan; toteż zapłodniona komórka jajowa zawiera z reguły dwie kopie tego planu, który kształtuje wczesne stadia przyszłego osobnika.

Nazywając strukturę włókien chromosomowych „zakodowanym scenariuszem", mamy na myśli, że wszechwiedzący demon Laplace'a, dla którego nie byłby tajemnicą żaden związek przyczynowy, potrafiłby na podstawie tej struktury przewidzieć,

[1] Chromatyna znaczy „substancja dająca się barwić"; cecha ta wykorzystywana jest w niektórych technikach mikroskopowych.

[2] Obecnie wiemy, że w każdej komórce somatycznej człowieka znajduje się 46 (czyli 2 × 23) chromosomów (przyp. red.).

czy w odpowiednich warunkach z jaja powstanie czarny kogut czy dropiata kura, mucha czy kukurydza, rododendron czy żuk, mysz czy kobieta. Dodać powinniśmy, że wygląd komórek jajowych jest bardzo często zadziwiająco podobny. A jeśli nawet, jak w przypadku stosunkowo wielkich jaj ptaków i gadów, tak nie jest, to jaja różnią się nie strukturą, lecz ilością substancji odżywczej, jaką ze zrozumiałych względów muszą zawierać.

Jednakże termin „zakodowany scenariusz" nie mówi wszystkiego. Struktura chromosomowa jest zarazem narzędziem realizacji tego scenariusza. Jest jakby jednocześnie władzą ustawodawczą i wykonawczą, czy też – by użyć innego porównania – wizją architekta i budowlanym przepisem wykonawczym.

Wzrost organizmu poprzez podział komórek (mitoza)

Jak zachowują się chromosomy w procesie ontogenezy?[3]

Wzrost organizmu jest rezultatem kolejnych podziałów komórek. Podział taki nazywa się mitozą. W życiu komórki nie jest to zdarzenie tak częste, jak można by sądzić, zważywszy ogromną liczbę komórek składających się na dojrzały organizm. Początkowo wzrost przebiega szybko; jajo dzieli się na dwie komórki, które po kolejnym podziale dają pokolenie złożone z czterech komórek i dalej: 8, 16, 32, 64 itd. Częstotliwość, z jaką zachodzi podział w różnych częściach organizmu, nie jest identyczna, co narusza regularność tego szeregu. Za pomocą prostego rachunku można jednak obliczyć, że średnio 50 do 60 kolejnych podziałów wystarczy, by wyprodukować tyle komórek, z ilu zbudowany jest organizm dorosłego człowieka[4] – czy, powiedzmy, dziesięciokrotnie więcej, uwzględniając

[3] Ontogeneza to rozwój osobnika za jego życia, natomiast filogeneza to rozwój gatunku w epokach geologicznych.

[4] Czyli, w dużym przybliżeniu, setki lub tysiące bilionów (10^{14} lub 10^{15}) komórek.

wymianę komórek w czasie całego życia. Tak więc komórki, z których składa się mój organizm, są pięćdziesiątym lub sześćdziesiątym pokoleniem jaja, jakim kiedyś byłem.

Podczas mitozy każdy chromosom ulega podwojeniu

Jak zachowują się chromosomy w toku mitozy? Otóż podwajają się obydwa ich zestawy, obie kopie zakodowanego planu. Ten niezwykle interesujący proces intensywnie badano pod mikroskopem; jest on jednak zbyt skomplikowany, bym opisywał go tu szczegółowo. W rezultacie – i to jest najistotniejsze – każda komórka potomna wyposażona jest w dwa pełne zestawy chromosomów komórki rodzicielskiej. Toteż wszystkie komórki składające się na organizm są identyczne pod względem ich wyposażenia w chromosomy.[5]

Aczkolwiek nie bardzo rozumiemy jeszcze mechanizm tego procesu, to jednak fakt, że każda komórka, nawet najmniej ważna, wyposażona jest w dwie kompletne kopie zakodowanego scenariusza rozwoju, ma niewątpliwie zasadnicze znaczenie dla funkcjonowania organizmu. Nie tak dawno, jak donosiły gazety, generał Montgomery uznał za bardzo ważne, by podczas kampanii afrykańskiej każdy żołnierz jego armii znał szczegółowy plan operacyjny. Jeśli to prawda (co nie wykluczone, zważywszy niezawodność jego oddziałów), jest to wyśmienita analogia omawianego tu zjawiska, w którego prawdziwość nie sposób wątpić. Faktem najbardziej zadziwiającym jest zachowująca się w procesie podziału podwójność zestawu chromosomów.[6] O tym, że jest to zasadnicza cecha mechanizmu dziedziczenia, świadczy jedyne odstępstwo od tej reguły, którym zajmiemy się teraz.

[5] Proszę biologów, by wybaczyli mi pominięcie wyjątkowego przypadku osobników mozaikowych.

[6] Dziś wiemy, że zapewnia to struktura DNA – podwójna helisa, której każda z dwóch nici odtwarza w toku podziału nić drugą (przyp. tłum.).

Podział redukcyjny (mejoza) i zapłodnienie (syngamia)

Wkrótce po rozpoczęciu rozwoju organizmu pewna grupa komórek zostaje „przeznaczona" do produkowania w stadium dojrzałym tzw. gamet, to znaczy plemników lub komórek jajowych niezbędnych do rozmnażania dorosłego osobnika. „Przeznaczenie" oznacza tu, że komórki takie nie będą spełniały żadnych innych funkcji i ulegną bardzo nielicznym podziałom mitotycznym. Za pośrednictwem wyjątkowego rodzaju podziału, zwanego redukcyjnym, czyli mejozy, ze wspomnianych komórek w stadium dojrzałego organizmu na krótko przed tym, nim ma dojść do zapłodnienia, powstają gamety. W toku mejozy podwójny zestaw chromosomów komórki rodzicielskiej dzieli się na dwa pojedyncze zestawy i każda komórka potomna (gameta) otrzymuje tylko jeden z nich. Inaczej mówiąc, podczas mejozy nie dochodzi do podwojenia liczby chromosomów, jak dzieje się w czasie mitozy, lecz każda gameta otrzymuje połowę, to znaczy zamiast dwóch – jedną pełną kopię zakodowanego planu rozwoju; w przypadku człowieka – są to 24 chromosomy zamiast 2 × 24, czyli 48.[7]

Komórki z pojedynczym zestawem chromosomów zwane są haploidami (od greckiego słowa απλοῦς – pojedynczy). Gamety są więc haploidami, a normalne komórki – diploidami (od greckiego διπλοῦς – podwójny). Komórki z trzema, czterema lub większą liczbą zestawów chromosomów zdarzają się rzadko i nazywa się je odpowiednio triploidami, tetraploidami lub poliploidami.

W wyniku aktu zapłodnienia haploidalna gameta męska (plemnik) łączy się z haploidalną gametą żeńską (jajo), i tak komórki zapłodnionego jaja stają się diploidami. Jeden z zestawów chromosomów pochodzi od ojca, a drugi – od matki.

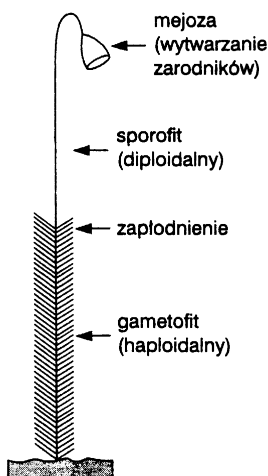
[7] Patrz przypis na str. 33 (przyp. red.).

Osobniki haploidalne

Wyjaśnić należy tu jeszcze jedną kwestię. Choć temat nasz nie wymagałby jej omawiania, warto się nad nią zatrzymać, ponieważ wskazuje ona, iż każdy pojedynczy zestaw chromosmów zawiera zakodowany scenariusz rozwoju organizmu.

Istnieją mianowicie przypadki mejozy, po których nie następuje w krótkim czasie zapłodnienie, a komórka haploidalna (gameta) ulega licznym podziałom mitotycznym, co prowadzi do powstania całego haploidalnego osobnika. Przykładem jest pszczeli samiec, truteń, który powstaje na drodze partenogenezy – z nie zapłodnionego, haploidalnego jaja królowej. Truteń nie ma ojca! Składa się wyłącznie z komórek haploidalnych. Można by go nawet nazwać ogromnie powiększonym plemnikiem. Jak powszechnie wiadomo, jedyną jego funkcją życiową jest zapładnianie jaj, z których rodzą się samice.

Nonsensem byłoby jednak sądzić, że przypadek trutnia jest jedynym takim w przyrodzie. Istnieją pewne grupy roślin, u których haploidalna gameta powstająca w wyniku mejozy, zwana zarodnikiem, spadając na ziemię, wydaje – niczym nasiono – haploidalną roślinę porównywalną co do wielkości z rośliną diploidalną. Rycina 5 przedstawia rozwój pospolitego w lasach mchu. Dolna, liściasta część rośliny, zwana gametofitem, jest haploidalna; w górnej swej części wytwarza ona organy płciowe i gamety, z których w wyniku wzajemnego zapłodnienia rozwija się w normalny sposób roślina diploidalna – goła łodyga (trzonek) zakończona zarodnią (sporofit). Nazywa się ją sporofitem, ponieważ w jej zarodni powstają na drodze mejozy zarodniki (spory). Kiedy zarodnia otwiera się, zarodniki dostają się do gleby i znów wydają liściastą łodygę. Proces ten zwany jest przemianą pokoleń. W analogiczny sposób spojrzeć można na zwierzęta i na człowieka. W tym jednak przypadku „gametofit" jest bardzo krótko żyjącym pokoleniem jednokomórkowym – jajem lub plemnikiem. Nasz organizm zaś to sporofit. Nasze „zarodniki" to komórki płciowe, z których w efekcie mejozy pojawia się pokolenie pojedynczych komórek.



Ryc. 5. Przemiana pokoleń

Niezwykła doniosłość podziału redukcyjnego

Najważniejszym, rzeczywiście decydującym zdarzeniem w procesie reprodukcji jest nie zapłodnienie, lecz mejoza. Jeden zestaw chromosomów pochodzi od ojca, drugi od matki. Ani przypadek, ani przeznaczenie nie mogą zmienić tego faktu. Każdy człowiek[8] zawdzięcza połowę swej substancji dziedzicznej matce, a połowę – ojcu. Fakt, że któraś połowa zdaje się przeważać, wynika z przyczyn, o których niżej będzie mowa. (Najprostszym tego przykładem jest oczywiście płeć).

Inaczej jednak przedstawia się sprawa, kiedy rozważamy dziedziczenie ze strony dziadków. Niech mi wolno będzie wziąć jako przykład chromosomy mego własnego ojca, dajmy na to chromosom piąty. Jest on wierną kopią chromosomu piątego bądź to mego dziadka, bądź babki. Obie ewentualności były

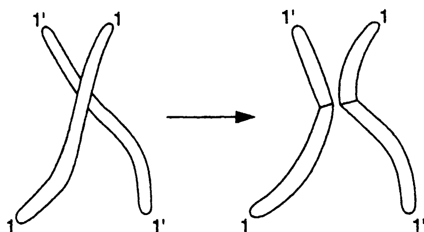
[8] Dla zwięzłości pomijam tu niezwykle interesujące zagadnienie determinacji płci oraz cech z nią związanych (jak na przykład ślepoty na barwy).

równie możliwe, a o tym, która się zrealizowała, zadecydował w listopadzie 1886 roku przypadek podczas mejozy w organizmie mego ojca, w wyniku której parę dni później doszło do mego poczęcia. To samo dotyczy wszystkich pozostałych chromosomów, od pierwszego do dwudziestego czwartego[9], zarówno ze strony mego ojca, jak mojej matki, przy czym dziedziczenie każdego spośród 48 jest niezależne od dziedziczenia pozostałych. Nawet gdyby wiadomo było, że mój chromosom piąty pochodzi od Josefa Schrödingera – mego dziadka ze strony ojca – to chromosom siódmy mógłby już z równym prawdopodobieństwem pochodzić od niego, jak od jego żony Marii, z domu Bogner.

Crossing-over. Lokalizacja cech

W dziedziczeniu od dziadków czysty przypadek odgrywa wszakże jeszcze większą rolę niż przypisywaliśmy mu dotąd, zakładając *implicite*, czy też nawet *explicite*, że określony chromosom pochodzi bądź od dziadka, bądź od babki, czyli że w toku procesu dziedziczenia nie ulega podziałowi. W rzeczywistości najczęściej dzieje się inaczej. Przed rozdzieleniem się homologicznych chromosomów w, powiedzmy, organizmie ojca podczas podziału redukcyjnego, każda ich para łączy się i często dochodzi wtedy do wzajemnej wymiany dużych ich części (co przedstawiono na rycinie 6). W wyniku tego procesu, zwanego *crossing-over* (lub rekombinacją chromosomów homologicznych) dwie cechy zlokalizowane w odpowiednich częściach chromosomu zostają oddzielone – wnuk odziedziczy jedną z nich po dziadku, a drugą po babce. Proces *crossing-over*, do którego nie dochodzi ani bardzo często, ani bardzo rzadko, dostarcza nam bezcennej informacji dotyczącej lokalizacji cech w chromosomach. Aby dokładnie opisać to zjawisko, musielibyśmy odwołać się do pojęć, o których będzie mowa dopiero w następnym rozdziale (heterozygotyczność, dominacja cech itp.). Ponieważ jednak zmuszałoby to nas do

[9] Patrz przypis na str. 33 (przyp. red.).



Ryc. 6. *Crossing-over*. Po lewej – zetknięcie się dwóch homologicznych chromosomów; po prawej – po wymianie odcinków i rozejściu się chromosomów.

nadmiernego odejścia od tematu, pozwolę sobie na wskazanie teraz rzeczy najważniejszej.

Gdyby nie dochodziło do *crossing-over*, dwie cechy, za które odpowiedzialny jest dany chromosom, przekazywane byłyby zawsze łącznie – każdy potomek odznaczający się jedną z nich musiałby odznaczać się również drugą. Natomiast dwie cechy, za które odpowiedzialne są różne chromosomy, albo nigdy nie byłyby dziedziczone łącznie (gdyby były związane z parą homologicznych chromosomów jednego z przodków, ta bowiem zawsze zostaje rozdzielona), bądź byłyby dziedziczone łącznie, z prawdopodobieństwem 1/2.

Proces *crossing-over* nakłada się na te reguły. O jego częstotliwości przekonać się można, badając występowanie danej cechy w kolejnych pokoleniach, będących efektem wielokrotnego celowego doświadczalnego krzyżowania. Analiza statystyczna skłania do przyjęcia hipotezy roboczej, zgodnie z którą dwie cechy „sprzężone" ze sobą, znajdujące się na tym samym chromosomie, są tym rzadziej rozdzielane przez *crossing-over*, im bliżej siebie są na nim zlokalizowane. Dzieje się tak, albowiem cechy zlokalizowane na krańcach chromosomów zostają zawsze rozdzielone podczas *crossing-over*, niezależnie od punktu, w którym ten proces zachodzi; cechy zlokalizowane obok siebie natomiast rozdzielone zostaną tylko w przypadku, gdy punkt wymiany znajdzie się dokładnie między nimi. (Prawie to samo dotyczy rekombinacji cech zlokalizowanych w homologicznych chromosomach tego samego

przodka). Dzięki temu można się spodziewać, że sporządzając „statystykę sprzężeń" cech, uda się uzyskać „mapę" ich lokalizacji na każdym chromosomie.

Oczekiwania te znalazły pełne potwierdzenie. W dokładnie zbadanych przypadkach (głównie, ale nie tylko *Drosophila*, czyli muszki owocowej) sprawdzane cechy rzeczywiście dzielą się na tyle nie sprzężonych ze sobą grup, ile występuje różnych chromosomów (u *Drosophila* – 4). Dla każdej z tych grup sporządzić można liniową mapę obrazującą ilościowo stopień sprzężenia dowolnej pary cech danej grupy. I raczej nie ma wątpliwości, że są one ściśle zlokalizowane, i to zlokalizowane liniowo, na co wskazuje również kształt chromosomów.

Ponieważ nie powiedzieliśmy dotąd, co dokładnie rozumiemy poprzez „cechę", przedstawiony wyżej schemat mechanizmu dziedziczenia wydaje się dość abstrakcyjny, mało konkretny, a nawet nieco naiwny. Rozdzielenie na poszczególne cechy schematu organizmu, który jest przecież pewną „całością", nie wydaje się zabiegiem właściwym ani możliwym do przeprowadzenia. Tym, co w konkretnym przypadku udaje się zwykle stwierdzić, jest tylko fakt, że para przodków różniła się od siebie pod pewnym dobrze określonym względem (na przykład koloru oczu) i że potomstwo dziedziczy tę cechę po jednym z nich. W chromosomie lokalizujemy miejsce tej różnicy. (W języku fachowym nazywamy je *locus* lub – jeśli mamy na myśli hipotetyczne podłoże materialne warunkujące tę różnicę – gen). Moim zdaniem, mimo iż zakrawa to na językowy i logiczny nonsens, podstawowym pojęciem byłaby tu „różnica cech", a nie „cecha" jako taka. „Różnice cech" mają rzeczywiście charakter dyskretny, o czym przekonamy się w następnym rozdziale, gdy mowa będzie o mutacjach. Wówczas też mój suchy dotąd schemat nabierze więcej życia i barw.

Maksymalna wielkość genu

Wprowadziliśmy wyżej termin „gen" dla oznaczenia hipotetycznego materialnego nośnika określonej cechy dziedzicznej.

Musimy teraz zwrócić uwagę na dwie kwestie o istotnym znaczeniu dla dalszych rozważań. Pierwsza z nich to wielkość, lub dokładniej maksymalna wielkość, owego nośnika. Inaczej mówiąc: jaką objętość przypisać mamy jego lokalizacji? Kwestia druga to niezmienność genu, o której wnioskować można na podstawie trwałości schematu dziedziczenia.

Jeśli chodzi o wielkość, to istnieją dwie całkowicie niezależne od siebie oceny – jedna oparta na świadectwach genetycznych (doświadczenia hodowlane), druga zaś – na świadectwach cytologicznych (bezpośrednia obserwacja mikroskopowa). Pierwsza jest w zasadzie dość prosta. Zlokalizowawszy w opisany wyżej sposób znaczną liczbę cech na przykład muszki owocowej w jednym z jej chromosomów, wystarczy, abyśmy podzielili zmierzoną długość chromosomu przez liczbę cech i pomnożyli ją przez liczbę rekombinacji. Nie ulega bowiem wątpliwości, że tylko te cechy są różne, które bywają oddzielane od siebie w wyniku *crossing-over* chromosomów, a więc nie mogą być uwarunkowane przez tę samą (mikroskopową czy też cząsteczkową) strukturę. Z drugiej strony jest oczywiste, że tego rodzaju szacunek określa wielkość maksymalną, albowiem w wyniku badań genetycznych liczba wyodrębnionych cech stale rośnie.

Oszacowanie, do którego dochodzimy drugą metodą, choć wykorzystujące badania mikroskopowe, bynajmniej nie jest całkiem bezpośrednie. Niektóre komórki muszki owocowej (a mianowicie jej gruczołów ślinowych), a tym samym i ich chromosomy, są z jakiegoś powodu ogromnie powiększone. Można w nich odróżnić wiele poprzecznych ciemnych prążków. C. D. Darlington zauważył, że liczba tych prążków (2000 w badanym przez niego przypadku), choć znacznie większa, jest jednak tego samego rzędu, co liczba genów w tym chromosomie, oszacowana pierwszą metodą. Skłonny jest więc sądzić, że prążki te odpowiadają poszczególnym genom lub odstępom między nimi. Dzieląc długość chromosomu komórki o normalnej wielkości przez 2000, stwierdził, że gen ma objętość równą sześcianowi o boku 300 Å. Uwzględniając duże przybliżenie tego szacunku, można mniemać, że jest to wielkość porównywalna z objętością obliczoną za pomocą pierwszej metody.

Małe liczby

Szczegółowym omówieniem konsekwencji płynących z fizyki statystycznej dla omawianych tu faktów – czy też, jak powinienem zapewne powiedzieć, dla stosowania fizyki statystycznej do żywej komórki – zajmiemy się później. Tutaj chcę tylko zwrócić uwagę na fakt, że 300 Å to zaledwie 100 do 150 odległości międzyatomowych w cieczy lub ciele stałym, z czego by wynikało, że gen składa się z nie więcej niż miliona lub kilku milionów atomów. Jest to (ze względu na regułę $\sqrt{n}$) liczba stanowczo zbyt mała, by zakładać regularne, zgodne z jakąś prawidłowością fizyki statystycznej, zachowanie się genu. Liczba ta jest zbyt mała, nawet gdyby wszystkie atomy składające się na gen odgrywały analogiczną rolę jak w gazie czy też w kropli jakiejś cieczy. Gen zaś wedle wszelkiego prawdopodobieństwa nie jest jednorodną kroplą cieczy. Sądzić należy, że jest on dużą cząsteczką białka,[10] w której każdy atom, każdy rodnik i pierścień heterocykliczny pełni specyficzną rolę, inną niż pozostałe atomy, rodniki i pierścienie. W każdym razie jest to opinia takich czołowych genetyków, jak Haldane i Darlington, a nam wkrótce przyjdzie się zająć doświadczeniami genetycznymi potwierdzającymi ten pogląd.

Niezmienność

Przejdźmy teraz do drugiego ważnego pytania: z jakim stopniem niezmienności mamy do czynienia w przypadku cech dziedzicznych i jakimi wobec tego własnościami odznaczać się muszą struktury materialne będące ich nośnikiem?

Odpowiedzi na to pytanie udzielić można bez jakichś specjalnych badań. Już sam fakt, że mówimy o cechach dziedzicznych, wskazuje, iż uznajemy niemal absolutną ich nie-

[10] W 1944 roku Avery, Mac-Leod i McCarty wykonali pierwsze eksperymenty, które doprowadziły do odkrycia, że gen jest cząsteczką DNA (przyp. red.).

zmienność. Nie wolno nam bowiem zapominać, że to, co rodzice przekazują dziecku, nie jest tym czy innym szczegółem – haczykowatym nosem, krótkimi palcami, skłonnością do reumatyzmu czy hemofilii itp. Wygodnie jest wybrać tego rodzaju cechy do badań praw dziedziczenia. Tym jednak, co jest przekazywane bez znaczących zmian przez pokolenia, niezmienne w ciągu stuleci (choć nie w ciągu dziesiątków tysięcy lat) i odtwarzane każdorazowo w wyniku transmisji materialnej struktury dwóch komórkowych jąder łączących się, by stworzyć zapłodnione jajo, jest cały (czterowymiarowy) wzorzec „fenotypu", wyraźny przejaw natury każdego organizmu. Jest to niebywały cud, ale inny, jeszcze większy, choć ściśle z nim związany, polega na tym, że chociaż całe nasze istnienie opiera się na tego rodzaju akcie, to jednak potrafimy uzyskać znaczną o nim wiedzę. Myślę, że być może wiedza ta będzie kiedyś bliska pełnego zrozumienia tego pierwszego cudu, drugi natomiast pozostanie zapewne na zawsze niepojęty.

3

Mutacje

A co w niepewnym się objawia stanie
To myślą wiecznotrwałą umacniajcie.

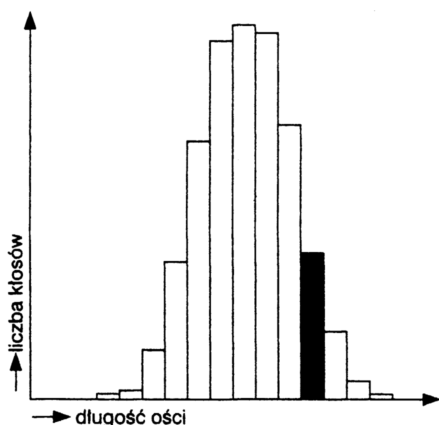
Johann Wolfgang Goethe (przełożył Jacek St. Buras)

Mutacje skokowe – podłoże doboru naturalnego

Fakty przedstawione wyżej na potwierdzenie trwałości przypisywanej strukturze genowej są zbyt banalne, aby mogły nas zadziwić bądź zostać uznane za bez reszty przekonujące. W tym przypadku stare powiedzenie, że wyjątki potwierdzają regułę, raz jeszcze okazuje się prawdziwe. Gdyby nie było wyjątków od reguły, że dzieci są podobne do rodziców, pozbawieni bylibyśmy nie tylko wszystkich tych pięknych doświadczeń, które ujawniają nam mechanizm dziedziczenia, ale również niezliczonych eksperymentów samej przyrody kształtującej gatunki na drodze doboru naturalnego i przeżywania najlepiej dostosowanych.

Wychodząc z tego założenia i przypominając raz jeszcze, że nie jestem biologiem, spróbuję przedstawić istotne w tej kwestii fakty.

Wiemy dziś z całą pewnością, że Darwin mylił się, gdy traktował drobne, ciągłe, przypadkowe zmiany, zdarzające się zawsze nawet w najbardziej jednorodnych populacjach, jako materiał dla działania doboru naturalnego. Zostało bowiem dowiedzione, że zmiany te nie są dziedziczone. Jest to fakt na tyle ważny, że powinniśmy się nim zająć przynajmniej pokrótce. Jeśli z roku na rok mierzylibyśmy długość ości kłosów czy-



Ryc. 7. Długość ości czystej odmiany jęczmienia – rozkład. Czarny słupek przedstawia odmianę wybraną do siewu (dane nie pochodzą z rzeczywistych badań – zostały podane dla ilustracji).

stej odmiany jęczmienia i ujęlibyśmy wyniki na wykresie (ryc. 7), to uzyskalibyśmy krzywą o kształcie dzwonu. Innymi słowy: przeważałaby pewna długość średnia, a odchylenia od niej zachodziłyby z określoną częstotliwością.

Weźmy teraz kłosy o ościach dłuższych niż średnia, z dostatecznie licznej próbki (zaznaczonej na rysunku na czarno), i wysiejmy odpowiednio dużo pochodzącego od niej ziarna. Zgodnie z oczekiwaniami Darwina krzywa sporządzona na podstawie nowych danych powinna ulec przesunięciu na prawo. Czyli, innymi słowy, dzięki selekcji średnia długość ości powinna wzrosnąć. Tak się jednak nie stanie, jeśli mieliśmy do czynienia rzeczywiście z czystą odmianą. Krzywa uzyskana na podstawie nowych danych niczym nie będzie się różnić od pierwszej i ten sam efekt uzyskalibyśmy, selekcjonując kłosy o ościach krótszych od średnich. Selekcja niczego nie zmienia, ponieważ drobne, ciągłe zmiany nie są dziedziczone. Najwyraźniej nie zależą od struktury substancji dziedzicznej i mają charakter przypadkowy. Jednakże około czterdziestu lat temu Holender de Vries stwierdził, że nawet w potomstwie bardzo starannie wyselekcjonowanej odmiany pewna niewielka liczba

osobników, powiedzmy 2–3 na 10 tysięcy, odznaczać się będzie jakimiś skokowymi zmianami. Przymiotnik „skokowe" nie znaczy, że chodzi o zmiany znaczne, lecz o pewną nieciągłość, charakteryzującą się brakiem stadiów pośrednich między osobnikami niezmienionymi a takimi, w których zmiany te nastąpiły. Tego rodzaju zmiany de Vries nazwał mutacjami. Faktem istotnym jest właśnie ich nieciągłość. Fizykowi przywodzi to na myśl teorię kwantów – pomiędzy dwoma sąsiednimi poziomami energetycznymi również nie ma poziomów pośrednich. Fizyk wręcz skłonny jest obrazowo nazwać teorię mutacji de Vriesa teorią kwantów biologii. Przekonamy się niżej, że nie idzie tu bynajmniej o metaforę. Mutacje faktycznie spowodowane są przeskokami kwantowymi w genach. Kiedy jednak de Vries opublikował swe odkrycie w 1902 roku, teoria kwantów liczyła sobie zaledwie dwa lata. Trudno się dziwić, że dopiero następne pokolenia badaczy dostrzegły ukryty związek między obiema teoriami.

Mutacje ujawniają się w następnych pokoleniach, co znaczy, że są dokładnie dziedziczone

Mutacje są dziedziczone równie dokładnie jak cechy niezmutowane. W pierwszym pokoleniu jęczmienia opisywanego powyżej może się na przykład znaleźć kilka kłosów z ośćmi, których długość nie mieści się w dotychczasowym przedziale zmienności, powiedzmy, kłosy zupełnie pozbawione ości. Byłaby to właśnie mutacja w rozumieniu de Vriesa, a wszystkie uzyskane z tej odmiany rośliny potomne również będą pozbawione ości.

Mutacja jest więc z pewnością zmianą otrzymywaną w spadku i musi się wiązać z jakąś zmianą substancji dziedzicznej. Rzeczywiście, doświadczenia, które ujawniły nam mechanizm dziedziczenia, polegały najczęściej na starannej analizie cech potomstwa uzyskanego dzięki zaplanowanym

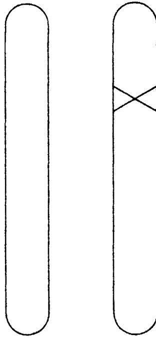
krzyżówkom odmian zmutowanych (czasem wielokrotnie zmutowanych) z niezmutowanymi lub inaczej zmutowanymi. Z drugiej strony, ze względu na to, że mutacje są przekazywane dziedzicznie, one właśnie są właściwym materiałem dla doboru naturalnego kształtującego gatunki zgodnie z teorią Darwina, to jest poprzez eliminację odmian niedostosowanych i przeżywanie osobników dostosowanych najlepiej. W teorii Darwina słowem „mutacje" należy zastąpić określenie „drobne, przypadkowe zmiany" (tak jak w teorii kwantów określenie „przeskok kwantowy" weszło na miejsce „ciągłego przekazu energii"). Jeśli trafnie interpretuję poglądy większości biologów, teoria Darwina nie wymaga poza tym większych zmian.[1]

Lokalizacja. Cechy recesywne i dominujące

Zajmę się teraz kolejnymi faktami dotyczącymi mutacji, przy czym uczynię to znów w sposób nieco schematyczny, nie wskazując, jak jeden po drugim ujawniły je świadectwa empiryczne.

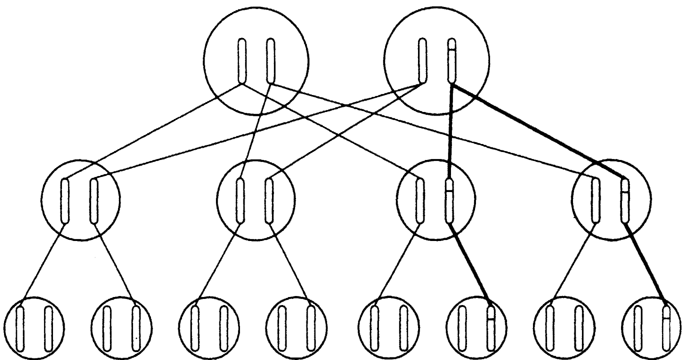
Należałoby oczekiwać, że każda zaobserwowana mutacja spowodowana jest przez jakąś zmianę w określonej części chromosomu. I tak też się dzieje. Trzeba podkreślić, że zmiana zachodzi tylko w jednym chromosomie, podczas gdy drugi, homologiczny, pozostaje nienaruszony. Rycina 8 ilustruje ten stan rzeczy, a krzyżyk wskazuje *locus*, w którym nastąpiła zmiana. Świadczy o tym rezultat skrzyżowania osobnika zmutowanego (zwanego często mutantem) z niezmutowanym.

[1] Szeroko dyskutowano zagadnienie, czy podstawą doboru naturalnego nie są mutacje ukierunkowane w pożądanym i pożytecznym kierunku. Mój osobisty pogląd w tej kwestii jest bez znaczenia, muszę jednak podkreślić, że w dalszych wywodach pomijam całkowicie koncepcję „mutacji ukierunkowanych". Nie mogę też podejmować tu zagadnienia „genów włączających" i „poligenów", jakkolwiek byłoby ono istotne dla zrozumienia mechanizmu doboru i ewolucji.

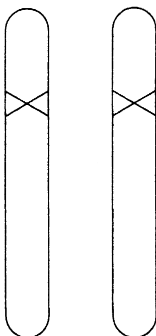


Ryc. 8. Mutant heterozygotyczny. Krzyżyk oznacza zmutowany gen.

Wówczas bowiem dokładnie połowa potomstwa jest zmutowana, a połowa – normalna. Tego też – jak wskazuje rycina 9 – należałoby się spodziewać jako rezultatu rozdzielenia się homologicznych par chromosomów podczas mejozy mutanta. Rycina 9 przedstawia rodowód trzech kolejnych pokoleń, z tym że każdego z osobników reprezentuje tylko jedna para chromosomów. Należy sobie zdawać sprawę, że gdyby oby-



Ryc. 9. Dziedziczenie mutacji. Linie cienkie oznaczają przekaz niezmutowanego chromosomu, grube – zmutowanego. Chromosomy, do których nie prowadzą żadne linie, pochodzą od nie oznaczonych na rysunku partnerów krzyżowania w drugim pokoleniu (zakłada się, że nie byli oni spokrewnieni i nie mieli zmutowanego genu).



Ryc. 10. Mutant homozygotyczny, występujący u 25% potomstwa powstałego w wyniku samozapłodnienia mutanta heterozygotycznego (ryc. 8) lub ze skrzyżowania dwóch mutantów heterozygotycznych.

dwa chromosomy mutanta były zmutowane, to całe pierwsze pokolenie potomne miałoby taką samą (zmieszaną) substancję dziedziczną i pod tym względem różniłoby się od każdego z rodziców.

Eksperymentowanie w tej dziedzinie nie jest wszakże tak proste, jakby na to wskazywały dotychczasowe wywody. Komplikuje je drugi istotny fakt, a mianowicie niektóre mutacje mają charakter ukryty. Cóż to znaczy?

W przypadku mutanta dwie kopie zakodowanego scenariusza nie są identyczne. Są one, przynajmniej w tym jednym miejscu, dwoma różnymi „tekstami", czy też dwiema wersjami jednego tekstu. Należałoby zapewne od razu dodać, że błędem byłoby traktowanie pierwotnego „tekstu" jako „ortodoksyjnego", a zmutowanego jako „herezję". Traktować je powinniśmy w zasadzie jako równouprawnione, albowiem pierwotny również powstał w efekcie jakichś mutacji.

W rzeczywistości „wzorzec" danego osobnika odpowiada na ogół jednej bądź drugiej wersji, a więc osobnik ten może być albo zmutowany, albo normalny. Wersja, która ujawnia się, zwana jest dominującą, odmienna zaś – recesywną; innymi słowy mutacja jest recesywna lub dominująca w zależności od tego, czy wywiera natychmiastowy wpływ na „wzorzec" osobnika, czy nie.

Mutacje recesywne są nawet częstsze od dominujących; są one bardzo ważne, mimo że na początku zupełnie się nie ujawniają. Aby zmienić „wzorzec", mutacje muszą być obecne w obu chromosomach (ryc. 10). Osobniki takie powstają w wyniku skrzyżowania dwóch recesywnych mutantów bądź krzyżowania się mutanta z samym sobą, co możliwe jest, a nawet zdarza się często u roślin dwupiennych. Łatwo dostrzec, że w takich przypadkach zmutowany „wzorzec" będzie się przejawiał u około 1/4 osobników potomnych.

Pewne terminy specjalistyczne

Myślę, że dla jasności warto teraz wprowadzić pewne terminy specjalistyczne. To, co nazywałem dotąd „wersją (czy odmianą) zakodowanego scenariusza" – obojętne, zmutowanego czy nie, przyjęto nazywać allelem. Jeśli, jak na rycinie 8, wersje te różnią się od siebie, mamy do czynienia z heterozygotą ze względu na dany *locus*. Gdy są identyczne, jak u niezmutowanego osobnika lub jak w sytuacji przedstawionej na rycinie 10, mówimy o homozygocie. Recesywne allele przejawiają się więc tylko wówczas, gdy wystąpią u homozygotycznego osobnika, natomiast dominujące – niezależnie od tego, czy znajdą się u osobnika hetero-, czy homozygotycznego pod względem tego allelu.

Barwa jest bardzo często cechą dominującą wobec braku ubarwienia (lub bieli). Groszek będzie, na przykład, kwitnąć na biało tylko wówczas, gdy ma „recesywne allele odpowiedzialne za biel" w obu odpowiednich chromosomach, to znaczy kiedy jest homozygotą ze względu na biel. Wszystkie jego rośliny potomne również będą białe. Ale gdy jeden allel jest „czerwony", a drugi „biały" (heterozygota), wówczas kwiaty groszku będą czerwone i tak samo będzie wtedy, gdy oba jego allele będą „czerwone" (homozygota). Różnica między tymi dwoma przypadkami przejawi się dopiero w następnym pokoleniu: wśród potomstwa czerwonych heterozygot część będzie biała, podczas gdy całe potomstwo czerwonych homozygot będzie wyłącznie czerwone.

Fakt, że dwa osobniki mogą wyglądać dokładnie tak samo, mimo istotnych różnic w substancji dziedzicznej, jest tak ważny, że niezbędne jest ścisłe ich rozróżnienie. Genetycy powiadają, że mają one jednakowy fenotyp, lecz różny genotyp. Tak więc ostatnie akapity podsumować można krótkim, ale sformułowanym w ściśle specjalistycznym języku twierdzeniem:

Allele recesywne przejawiają się w fenotypie tylko wówczas, kiedy genotyp jest homozygotyczny.

W miarę potrzeby korzystać będziemy z tych terminów, przypominając wszakże Czytelnikowi ich znaczenie.

Szkodliwe skutki krzyżówek między krewnymi

Mutacje recesywne, jak długo są heterozygotyczne, nie stanowią oczywiście podłoża dla funkcjonowania doboru naturalnego. Jeśli są szkodliwe, jak to się często zdarza, to jednak nie zostają wyeliminowane, ponieważ są ukryte. Toteż ogromna liczba takich mutacji może się gromadzić, nie wyrządzając natychmiast żadnej szkody. Są one wszakże przekazywane połowie potomstwa i ma to poważne skutki dla gatunku ludzkiego, a także dla bydła, drobiu oraz innych zwierząt, których własności mają dla nas bezpośrednie znaczenie. Rycina 9 zakłada, że osobnik płci męskiej (powiedzmy właśnie ja) jest heterozygotycznym nosicielem takiej szkodliwej, recesywnej mutacji, a więc że się ona nie przejawia. Załóżmy, że moja żona jest od niej wolna. Wówczas połowa naszych dzieci (drugie pokolenie) również będzie heterozygotycznymi nosicielami tej mutacji. Jeśli wszystkie one wydadzą potomstwo z osobnikami niezmutowanymi (nie uwidocznionymi na rycinie 9), to ten sam los spotka średnio 25% naszych wnuków.

Szansa na to, że złe skutki mutacji przejawią się, rośnie, kiedy dochodzi do krzyżowania takich mutantów, łatwo bowiem stwierdzić, że u 25% ich homozygotycznego potomstwa

mutacja się przejawi. Poza przypadkiem samozapłodnienia (możliwym tylko u roślin dwupiennych) największe niebezpieczeństwo groziłoby małżeństwu mojej córki z moim synem. Dla każdego z nich prawdopodobieństwo obecności ukrytej mutacji byłoby jednakowe i wynosiło 1/2, tym samym 1/4 potomstwa z owego kazirodczego związku byłaby zagrożona ujawnieniem się ukrytej mutacji. Współczynnik niebezpieczeństwa w przypadku małżeństwa kazirodczego między nimi z kolei wynosiłby 1/16.

Na mocy tej samej zasady współczynnik ten wynosi 1/64 w przypadku małżeństwa między moimi wnukami, którzy byliby kuzynami w pierwszej linii. Zagrożenie takie nie jest zbyt wielkie, toteż małżeństwa między kuzynami są zazwyczaj dopuszczane. Nie należy wszakże zapominać, iż rozważaliśmy konsekwencje jednej tylko ukrytej mutacji u każdego z partnerów (mojej żony i mnie), podczas gdy *de facto* każdy z rodziców może mieć wiele z nich. Jeśli wiem, że u mnie samego występuje taka mutacja, to mogę się spodziewać, że ma ją również jeden z ośmiu moich kuzynów w pierwszej linii. Doświadczenia z roślinami i zwierzętami zdają się wskazywać, że potomstwu z tego rodzaju związków oprócz stosunkowo nielicznych poważnych wad genetycznych grożą liczne, mniej groźne konsekwencje. Prawdopodobieństwo ich ujawniania się, nakładając się wzajemnie na siebie, powoduje niekorzystne skutki dla całego krzyżowanego w bliskim pokrewieństwie potomstwa. Ponieważ nie jesteśmy skłonni eliminować wad w tak zdecydowany sposób, jak czynili to Spartanie w górach Tajget, wiążące się z tymi zjawiskami niebezpieczeństwa grożące gatunkowi ludzkiemu powinniśmy traktować z całą powagą – dobór naturalny osobników najlepiej dostosowanych jest tu bowiem znacznie zredukowany, a nawet działa w odwrotnym kierunku. Antyselekcyjnych skutków nowożytnych masowych rzezi młodzieży wszystkich narodów w wyniku wojen bynajmniej nie równoważy okoliczność, że w bardziej prymitywnych warunkach wojny mogły selekcjonować plemiona lepiej dostosowane.

Uwagi ogólne i historyczne

Zadziwiający jest fakt, że recesywne allele w układach heterozygotycznych są całkowicie „przytłoczone" przez allele dominujące i w ogóle się nie przejawiają. Trzeba jednak wspomnieć, że od reguły tej zachodzą wyjątki. Kiedy homozygotyczną białą lwią paszczę krzyżuje się z również homozygotyczną purpurową lwią paszczą, wszystkie rośliny potomne są barwy pośredniej: ani białe, ani purpurowe (czego należałoby się spodziewać), lecz różowe. O wiele ważniejszy przypadek dwóch jednocześnie przejawiających się alleli dotyczy dziedziczenia grup krwi – ale kwestię tę musimy tu pominąć. Nie byłbym zdziwiony, gdyby się okazało, że przynajmniej na dłuższą metę recesywność jest stopniowalna i zależy od czułości testów stosowanych przy badaniu fenotypu.

W tym miejscu słów parę należy powiedzieć o początkach genetyki. Podstawę teorii (prawo dziedziczenia przez kolejne pokolenia cech, ze względu na które różnią się rodzice, a przede wszystkim zasadnicze rozróżnienie cech recesywnych i dominujących) zawdzięczamy słynnemu dziś mnichowi z zakonu augustianów, Grzegorzowi Mendlowi (1822–1884). Mendel nie wiedział nic ani o chromosomach, ani o mutacjach. W klasztornym ogródku w Brnie prowadził doświadczenia z groszkiem; krzyżował mianowicie jego rozmaite odmiany i badał kolejne pokolenia takich krzyżówek. Można powiedzieć, że eksperymentował z mutantami, których dostarczała mu przyroda. Wyniki swych badań opublikował już w 1866 roku w czasopiśmie wydawanym przez Naturforschender Verein w Brnie. Hobby opata nikogo szczególnie nie zainteresowało i nikt z pewnością nie zdawał sobie sprawy, że uzyskane przez niego wyniki staną się w XX wieku zaczynem nowej, najbardziej może pasjonującej dziś dziedziny wiedzy. Artykuł jego poszedł w zapomnienie i dopiero w 1900 roku jednocześnie i niezależnie od siebie odnaleźli go Correns z Berlina, de Vries z Amsterdamu i Tschermak z Wiednia.

Mutacje muszą zdarzać się rzadko

Jak dotąd mowa była wyłącznie o mutacjach szkodliwych, które są najliczniejsze. Trzeba jednak wyraźnie powiedzieć, że zdarzają się także mutacje korzystne. Kiedy spontaniczna mutacja stanowi mały krok w rozwoju gatunku, mamy wrażenie, że jest ona rodzajem dość ryzykownej „próby" jakiejś przypadkowej zmiany, która, gdy okazuje się szkodliwa, zostaje automatycznie wyeliminowana. Wskazuje to na pewną istotną kwestię: mutacje, aby stanowić materiał dla doboru naturalnego, muszą zachodzić rzadko. I tak jest faktycznie. Gdyby zachodziły tak często, że jednocześnie u tego samego osobnika byłoby ich kilkanaście, z reguły przeważałyby mutacje szkodliwe, a gatunek, zamiast ulegać doskonaleniu w drodze doboru, nie ulegałby zmianie lub skazany by był na zagładę. Zasadniczą rolę odgrywa tu względny konserwatyzm, będący rezultatem znacznej trwałości genu. Analogią może być funkcjonowanie jakiegoś urządzenia w fabryce. Aby udoskonalić metody produkcji, trzeba choćby na próbę wprowadzać innowacje. Żeby stwierdzić jednak, czy są korzystne, wprowadzać je trzeba pojedynczo, nie zmieniając pozostałych elementów urządzenia.

Mutacje wywoływane przez promieniowanie rentgenowskie

Musimy teraz omówić różne niezwykle pomysłowe badania genetyczne, które – jak się okaże – mają bezpośredni związek z głównym tematem naszych rozważań.

Niewielki odsetek mutacji u potomstwa, tzw. częstość mutacji spontanicznych, można zwielokrotnić, naświetlając rodziców promieniami X (rentgenowskimi) lub γ. Mutacje powstające w ten sposób nie różnią się niczym (prócz liczebności) od powstających spontanicznie i odnosi się wrażenie, iż każdą mutację „naturalną" spowodować można przez napromieniowanie. W dużych hodowlach muszki owo-

cowej (*Drosophila sp.*) liczne mutacje pojawiają się wielokrotnie; nadano im nazwy i, jak mówiliśmy wcześniej (str. 39–41), zdołano je zlokalizować w chromosomach. Wykryto nawet tak zwane allele wielokrotne, to znaczy dwie lub więcej różnych (oprócz niezmutowanej) „wersji" w tym samym *locus*; dla każdej pary takich alleli zachodzi stosunek „dominacji i recesywności", jeśli wystąpią one jednocześnie w tych samych *loci* obu homologicznych chromosomów.

Wyniki doświadczeń z promieniami rentgenowskimi prowadzą do wniosku, że dla każdego przypadku „przejścia" od osobnika normalnego do mutanta lub odwrotnie istnieje odpowiedni „współczynnik napromieniowania", określający odsetek takich mutantów w następnym pokoleniu w zależności od dawki napromieniowania rodziców przed zapłodnieniem.

Pierwsze prawo. Mutacja jest zdarzeniem jednostkowym

Prawa rządzące częstością mutacji indukowanych są zarazem bardzo proste i ogromnie pouczające. Polegam tu na doniesieniu N. W. Timofiejewa w „Biological Reviews" (t. IX, 1934), opartym głównie na jego własnych badaniach. Pierwsze prawo powiada:

(1) *Wzrost częstości mutacji jest proporcjonalny do dawki napromieniowania, można więc mówić o współczynniku wzrostu.*

Jesteśmy tak przyzwyczajeni do proporcjonalności, że łatwo możemy nie docenić dalekosiężnych konsekwencji tej prostej zależności. Aby zdać sobie z tego sprawę, zważmy, że cena nie zawsze jest proporcjonalna do ilości zakupionego towaru. Sprzedawca, gdy dysponuje nadwyżką towaru, może policzyć nam za dwanaście pomarańczy mniej niż dwa razy tyle, niż za sześć. Gdy towaru brak, może postąpić odwrotnie. W interesującym nas przypadku stwierdzamy natomiast, że

pierwsza połowiczna dawka promieniowania, indukująca, dajmy na to, jedną mutację u jednego na tysiąc potomków, nie wpływa w ogóle na pozostałych, to jest ani nie zwiększa prawdopodobieństwa pojawienia się u nich mutacji, ani nie uodparnia ich na nie przy dalszym naświetlaniu. W przeciwnym razie kolejna identyczna dawka promieniowania nie spowodowałaby znów pojawienia się jednego mutanta na tysiąc. Mutacje nie kumulują się więc, a dawki promieniowania nie wzmacniają nawzajem. Wynika stąd, że mutacja jest pojedynczym zdarzeniem zachodzącym w jakimś chromosomie podczas naświetlania. Na czym polega to zdarzenie?

Drugie prawo. Lokalizacja zdarzenia

Oto co mówi drugie prawo:

(2) *Jeśli stosować będziemy promienie w szerokim zakresie długości fali, od miękkiego promieniowania X do bardzo twardych promieni γ, współczynnik nie ulegnie zmianie, o ile tylko stała pozostanie dawka promieniowania mierzona w tak zwanych jednostkach r,* to znaczy jeśli jej miarą jest liczba jonów w jednostce objętości odpowiednio dobranej substancji standardowej w tym czasie i miejscu, w którym doszło do napromieniowania rodziców.

Za substancję standardową obiera się powietrze; czyni się tak nie tylko dla wygody, ale również z tej racji, iż tkanki organiczne są złożone z pierwiastków o tych samych ciężarach atomowych, co składniki powietrza. Dolną granicę poziomu jonizacji lub pokrewnych procesów[2] (pobudzania) w tkance uzyskuje się, mnożąc po prostu liczbę jonizacji w powietrzu

[2] Jest to dolna granica, ponieważ inne procesy nie poddają się badaniom za pomocą pomiarów jonizacji, a mogą również wywołać mutacje.

przez stosunek gęstości. Tak więc nie ulega wątpliwości, a potwierdzają to bardziej wnikliwe badania, że pojedynczym zdarzeniem powodującym mutację jest jonizacja (lub proces pokrewny) zachodzący w jakiejś „krytycznej" objętości komórki rozrodczej. Jaka to objętość? Podstawą do jej oszacowania może być obserwowana częstość mutacji. Jeśli prawdopodobieństwo określonej mutacji w napromieniowanej gamecie przy dawce 50 000 jonów na cm^3 wynosiłoby 1/1000, to wynikałoby stąd, że objętość krytyczna wynosi tylko $1/1000 \times 1/50\,000\ cm^3$, czyli $1/50\,000\,000\ cm^3$ (podane liczby nie są oparte na pomiarach, wskazują tylko przykładowy rząd wielkości). Rzeczywisty szacunek podali M. Delbrück, N. W. Timofiejew i K. G. Zimmer[3] w artykule, na który powoływać się będę w rozważaniach teoretycznych w następnych dwóch rozdziałach. Przyjęli oni do swych rozważań sześcian o boku 10 odległości międzyatomowych, zawierający około 1000 atomów. Zgodnie z najprostszą interpretacją tego wyniku znaczna szansa na spowodowanie określonej mutacji pojawia się wówczas, gdy jonizacja (lub inne pobudzenie) następuje w odległości nie większej niż 10 odległości międzyatomowych od określonego miejsca w chromosomie.

Praca Timofiejewa przynosi praktyczną wskazówkę, na którą chcę tu zwrócić uwagę, mimo iż nie dotyczy ona tematu naszych dociekań. Człowiek we współczesnych warunkach życia wystawiony jest często na promieniowanie rentgenowskie. Niebezpieczeństwa, jakie są z tym związane: oparzenia, rak czy bezpłodność, są dobrze znane, dlatego też osoby mające często do czynienia z tym promieniowaniem – na przykład lekarze i pielęgniarki – korzystają ze specjalnych ołowiowych ekranów lub fartuchów. Otóż, rzecz w tym, że nawet wówczas gdy te bezpośrednie zagrożenia dla jednostki są skutecznie ograniczone, pozostaje pośrednia groźba niewielkich szkodliwych mutacji w komórkach rozrodczych – mutacji podobnych do tych, o których wspominałem wcześniej, mówiąc o krzy-

[3] „Nachrichten a.d. Biologie des Geselschaft der Wissenschaften Göttingen", I, 1935, s. 189.

żówkach w bliskim pokrewieństwie. Przesadzając nieco, choć używając być może nazbyt naiwnego sformułowania, można powiedzieć, że niebezpieczeństwo małżeństwa między kuzynami w pierwszej linii jest dużo większe, jeśli ich babka pracowała przez długi czas jako pielęgniarka obsługująca aparaturę rentgenowską. Nie jest to groźba aż tak wielka, by niepokoić się nią musiał każdy człowiek. Wszelka ewentualność stopniowego „infekowania" gatunku ludzkiego przez niepożądane, ukryte mutacje winna stanowić jednak troskę całego społeczeństwa.

Świadectwa mechaniki kwantowej

I duch twój, chociaż wzlot podniebny go rozpala,
Samym symbolem się, obrazem zadowala.

Johann Wolfgang Goethe (przełożył Jacek St. Buras)

Trwałość, której nie wyjaśnia fizyka klasyczna

Posługując się tak subtelnym narzędziem jak promienie rentgenowskie (dzięki którym trzydzieści lat temu udało się dokładnie poznać atomową strukturę kryształów), biologowie i fizycy zdołali ostatecznie wspólnym wysiłkiem obniżyć górną granicę rozmiarów mikroskopowej struktury wyznaczającej makroskopowe cechy osobnicze, czyli wielkości genu. Okazało się, że granica ta jest znacznie niższa niż wskazywały wstępne szacunki, o których była mowa wcześniej (str. 42–43). Stajemy zatem wobec pytania, jak z punktu widzenia fizyki statystycznej pogodzić fakt składania się genu ze stosunkowo niewielkiej liczby atomów (rzędu 1000, a może i mniej)[1] z jego niemal cudowną trwałością i zachowaniem podlegającym ścisłym prawidłowościom?

Niech mi wolno będzie raz jeszcze uwydatnić ten problem na przykładzie. Liczni członkowie dynastii habsburskiej odznaczają się szczególną deformacją dolnej wargi („Habsburger Lippe"). Cesarska Akademia w Wiedniu, działająca pod auspicjami domu panującego, badała szczegółowo ten fakt

[1] Obecnie szacuje się, że średnia wielkość genu wynosi 5000 par zasad, a więc około 380 000 atomów (przyp. red.).

i opublikowała wyniki wraz z portretami członków rodziny. Okazało się, że cecha ta stanowi prawdziwy Mendlowski „allel" w stosunku do normalnego kształtu wargi. Przypatrując się portretom członków rodziny z XVI wieku i ich dziewiętnastowiecznych potomków, łatwo zgodzimy się, że struktura genu odpowiedzialnego za to odkształcenie przekazywana była przez stulecia z pokolenia na pokolenie, dokładnie odtwarzana podczas każdego z niezbyt licznych podziałów komórek rozrodczych. Co więcej, liczba atomów wchodzących w skład owego genu jest zapewne tego samego rzędu, co w przypadkach zbadanych za pomocą promieni rentgenowskich. Przez cały czas gen ów znajdował się w temperaturze około 36,6°C. Jak wytłumaczyć fakt, że trwający przez stulecia ruch cieplny nie odkształcił jego struktury?

Gdyby fizyk z końca ubiegłego stulecia, odwołując się wyłącznie do znanych mu i zrozumiałych praw natury, miał odpowiedzieć na to pytanie, znalazłby się w kłopocie. Być może po krótkim rozważeniu sytuacji powiedziałby (słusznie, jak się przekonamy), że musi tu odgrywać rolę jego struktura cząsteczkowa. Ówczesna chemia dysponowała już wtedy wiedzą o istnieniu i trwałości (stabilności) tego rodzaju struktur złożonych z atomów. Była to wszakże wiedza czysto empiryczna. O budowie cząsteczki oraz o silnych wiązaniach międzyatomowych, utrzymujących ją w całości, nie umiano nic powiedzieć. Wspomniana prawidłowa odpowiedź miałaby więc niewielką wartość tak długo, póki zagadkową trwałość struktur biologicznych tłumaczono by niemniej zagadkową trwałością cząsteczek chemicznych. Świadectwa mówiące, iż pozornie podobne cechy są przejawem tej samej zasady, są zawsze wątpliwe, póki zasady owej nie poznamy.

Wyjaśnienie przez teorię kwantów

Zasadę tę ujawniła teoria kwantów. Jak dziś wiemy, mechanizm dziedziczenia jest ściśle związany z procesami kwantowymi, więcej nawet: są one jego podstawą. Teorię tę zainicjo-

wał w 1900 roku Max Planck. Współczesnej genetyce początki dało natomiast (również w roku 1900) odnalezienie przez de Vriesa, Corrensa i Tschermaka artykułu Mendla oraz prace de Vriesa o mutacjach (1901–1903). Tak więc obie te teorie powstały niemal jednocześnie i trudno się dziwić, że nim stwierdzono związek między nimi, każda z nich musiała osiągnąć dojrzałość. W przypadku teorii kwantów trwało to ponad 25 lat; kwantowo-mechaniczną teorię wiązania chemicznego w ogólnych zarysach podali w latach 1926–1927 W. Heitler i F. London. Opiera się ona na subtelnych i dość zawiłych koncepcjach mechaniki kwantowej, zwanej również „mechaniką falową". Jej omówienie bez odwoływania się do aparatu matematycznego jest prawie niemożliwe i wymagałoby równie obszernej rozprawy, jak niniejsza. Jednakże teraz, kiedy na szczęście dysponujemy już teoriami, które przyczyniły się do wyjaśnienia wielu problemów, możliwe wydaje się bardziej bezpośrednie i wnikliwe ujęcie związku między „kwantowymi przeskokami" a mutacjami. Tym właśnie zamierzam się zająć.

Teoria kwantów, stany dyskretne, przeskoki kwantowe

Podczas gdy dotąd powszechnie sądzono, że przyroda nie czyni skoków, wielkim odkryciem teorii kwantów było stwierdzenie, iż Księga Natury pełna jest nieciągłości.

Dotyczy to w pierwszym rzędzie energii. Stany energetyczne ciał makroskopowych ulegają ciągłym zmianom. Tak na przykład wychylenia wahadła maleją wskutek oporu powietrza stopniowo. Ku zaskoczeniu wszystkich, trzeba było jednak uznać, że układy na poziomie atomowym zachowują się inaczej. Na podstawie przesłanek, których nie będę tu omawiał, musimy przyjąć, że układy takie ze swej natury znajdować się mogą tylko w niektórych określonych stanach energetycznych, zwanych „własnymi poziomami energetycznymi". Przejście od jednego takiego stanu do innego jest zjawiskiem dość tajemniczym, zwanym właśnie „przeskokiem kwantowym".

Jednakże nie tylko energia charakteryzuje dany układ. Wróćmy raz jeszcze do naszego wahadła, biorąc jednak pod uwagę, że ciężar zawieszony na długiej nici poruszać się może w różny sposób, z południa na północ, ze wschodu na zachód, po okręgu czy po elipsie. Popychając go lekko, możemy spowodować stopniowe przechodzenie od jednego ruchu do innego.

W przypadku układów mikroskopowych większość tego rodzaju charakterystyk ulega zmianom w sposób nieciągły. Tak jak energia są one skwantowane.

W rezultacie jądra atomowe oraz elektrony, tj. ich satelity, kiedy znajdą się blisko siebie i stworzą „układ", nie mogą utworzyć dowolnej konfiguracji, jaka da się pomyśleć. Ze względu na ich naturę zbiór stanów, w jakich mogą się znaleźć, jest wprawdzie bardzo liczny, ale dyskretny.[2] Nazywamy je zazwyczaj stanami własnymi układu albo poziomami energetycznymi. Należy wszakże pamiętać, że pełny opis stanu układu nie ogranicza się do wskazania wartości energii. Równie sensowne jest rozumienie stanu układu jako określonej konfiguracji wszystkich cząsteczek.

Przejście od jednej konfiguracji do innej to „przeskok kwantowy". Jeśli kolejny stan odznacza się wyższym poziomem energetycznym, „przeskok" jest możliwy tylko wówczas, gdy układ pobiera niezbędną energię z zewnątrz. Przejście do niższego poziomu może być spontaniczne i związane jest w wypromieniowaniem nadmiaru energii.

Cząsteczki

Wśród dyskretnych stanów danego zbioru atomów może (co nie znaczy, że musi) istnieć stan najniższy, maksymalnego zbliżenia do siebie jąder atomowych. Wówczas powstaje czą-

[2] Przedstawiam tę kwestię tak, jak czyni się to w ujęciach popularnych, i w tym kontekście jest to wystarczające. Mam jednak nieczyste sumienie, upowszechniam bowiem w ten sposób pewien istotny błąd. Rzeczywistość jest bardziej skomplikowana – w grę wchodzi niezdeterminowanie stanu, w jakim znajduje się układ.

steczka chemiczna. Należy podkreślić, że będzie się ona odznaczać pewną trwałością: konfiguracja tworzących ją cząsteczek nie może ulec zmianie, jeśli energia niezbędna do przeprowadzenia jej na wyższy poziom nie zostanie dostarczona z zewnątrz. Różnica poziomów energetycznych, będąca dobrze określoną wielkością, wyznacza ilościowo stopień trwałości cząsteczki. Fakt ten jest ściśle związany z podstawowym twierdzeniem teorii kwantów o „dyskretności poziomów energetycznych".

Czytelnik zechce uznać za pewnik, że fakty z dziedziny chemii potwierdziły w pełni przedstawione koncepcje; wyjaśniły one doskonale wartościowość chemiczną oraz wiele szczegółów dotyczących budowy cząsteczek chemicznych, energii wiązań oraz ich trwałości w różnych temperaturach. Na szczegółowe omawianie teorii Heitlera i Londona nie ma tu miejsca.

Trwałość cząsteczek zależy od temperatury

Zadowolić się tu musimy omówieniem kwestii o podstawowym znaczeniu dla biologii, a mianowicie trwałości cząsteczki chemicznej w różnych temperaturach. Przyjmijmy, że nasz układ atomowy znajduje się pierwotnie w najniższym możliwym stanie energetycznym. Aby go przenieść w stan wyższy, niezbędne jest dostarczenie określonej ilości energii. Najprościej to uczynić, „ogrzewając" naszą cząsteczkę. Ze względu na nieregularność ruchu cieplnego nie można wskazać takiej temperatury, w której przejście do wyższego stanu energetycznego nastąpi niewątpliwie i natychmiast. W każdej temperaturze (wyższej od absolutnego zera) zachodzi określone prawdopodobieństwo przejścia, tym większe, rzecz jasna, im wyższa temperatura. Najlepszym sposobem określenia tego prawdopodobieństwa jest wskazanie średniego czasu niezbędnego, aby przejście się dokonało, czyli „czasu oczekiwania".

Zgodnie z badaniami M. Polanyi'ego oraz E. Wignera[3] „czas oczekiwania" zależy od stosunku dwóch wielkości, a mianowicie różnicy energetycznej między poziomami przejścia (oznaczmy ją przez *W*) oraz energii ruchu cieplnego w danej temperaturze (oznaczmy temperaturę absolutną przez *T*, natomiast energię ruchu cieplnego przez *kT*).[4] Jest oczywiste, że prawdopodobieństwo przejścia będzie tym mniejsze, a czas oczekiwania tym dłuższy, im większy jest stosunek W/kT. Zadziwia, jak bardzo czas oczekiwania zależy od stosunkowo niewielkich zmian w obrębie tego stosunku. Wedle Delbrücka, gdy wynosi on 30, czas oczekiwania jest rzędu 1/10 sekundy; gdy wzrośnie do 50, czas oczekiwania wydłuża się do 16 miesięcy; w przypadku gdy *W* jest 60 razy większe od *kT* – czas oczekiwania wynosi 30 000 lat.

Dygresja matematyczna

Należałoby wyjaśnić w języku matematyki – przynajmniej dla tych Czytelników, do których on przemawia – powody tak dużej wrażliwości na różnice energetyczne czy temperatury oraz dodać kilka nowych uwag fizycznych o podobnym charakterze. Otóż wynika to z tego, że zależność czasu oczekiwania (*t*) od różnicy poziomów energetycznych (*W*) wyraża funkcja wykładnicza

$$t = \tau e^{W/kT},$$

gdzie τ to wielkość stała rzędu od 10^{-13} do 10^{-14} sekundy. Występowanie tutaj funkcji wykładniczej nie jest przypadkowe. Pojawia się ona nieodmiennie w statystycznej teorii ciepła, jest jakby jej stosem pacierzowym. Określa miarę nieprawdopodobieństwa tego, by tak wielka energia jak *W* skupiła się przypad-

[3] „Zeitschrift für Physik", Chemie (A) Haber Band 1928, s. 439.

[4] *k* to stała Boltzmanna; 3/2 *kT* to średnia energia kinetyczna atomu gazu w temperaturze *T*.

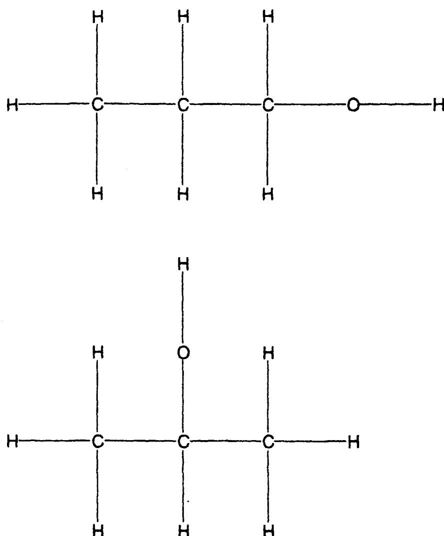
kowo w jakiejś części układu, i właśnie to nieprawdopodobieństwo tak mocno wzrasta, kiedy niezbędna jest duża wielokrotność średniej energii kT.

Przypadek gdy $W = 30\ kT$ (jak w przytoczonym wyżej przykładzie) zdarza się niezwykle rzadko. To, że czas oczekiwania jest w tym przypadku tak niewielki (wynosi zaledwie 1/10 s), wynika ze znikomej wielkości współczynnika τ. Współczynnik ten ma sens fizyczny i jest rzędu okresu drgań, jakie przez cały czas zachodzą w układzie. Można by było z grubsza powiedzieć, że współczynnik ten określa prawdopodobieństwo zgromadzenia wymaganej energii W. Choć prawdopodobieństwo to jest bardzo niewielkie, zachodzi jednak „z każdym drganiem", to znaczy 10^{13}–10^{14} razy w czasie każdej sekundy.

Pierwsza poprawka

Przedstawiając powyższe rozważania jako teorię trwałości cząsteczki chemicznej, zakładałem po cichu, że „przeskok" kwantowy, nazywany przejściem z jednego poziomu energetycznego na drugi, jeśli nawet nie powoduje pełnej dezintegracji cząsteczki, to w każdym razie prowadzi do innej konfiguracji tych samych atomów, czyli do powstania – jak powiedziałby chemik – cząsteczki izomerycznej (w przypadku biologii odpowiadałoby to innemu „allelowi" o tej samej lokalizacji, natomiast „przeskok" odpowiadałby procesowi zachodzenia mutacji).

Uznanie tej interpretacji, którą rozmyślnie uprościłem, wymaga dwóch poprawek. Na podstawie tego, co powiedziałem, można by sądzić, że zbiór atomów tworzyć może cząsteczkę chemiczną tylko na najniższym poziomie energetycznym, a na każdym poziomie wyższym staje się ona już „czymś innym". Otóż tak bynajmniej nie jest. Po najniższym poziomie następuje cały szereg poziomów; przejścia między nimi nie powodują żadnych dostrzegalnych zmian w konfiguracji całości – odpowiadają im tylko niewielkie drgania, o których była już



Ryc. 11. Dwa izomery alkoholu propylowego

mowa. Poziomy te również są skwantowane, ale różnice energii między nimi są niewielkie. Ruch cieplny spowodowany przez ogrzewanie może wywołać drgania już w stosunkowo niskich temperaturach. Gdy mamy do czynienia z dużą cząsteczką, możemy traktować owe drgania o wysokiej częstotliwości jako fale akustyczne, biegnące poprzez cząsteczkę i „nie czyniące jej szkody".

Tak więc pierwsza poprawka nie jest zbyt poważna. Powinniśmy mianowicie abstrahować od „wibracyjnej, subtelnej struktury" poziomów energetycznych i rozumieć, że „kolejny, wyższy poziom energetyczny" oznacza ten poziom, któremu odpowiada już zmiana konfiguracji atomów w cząsteczce.

Druga poprawka

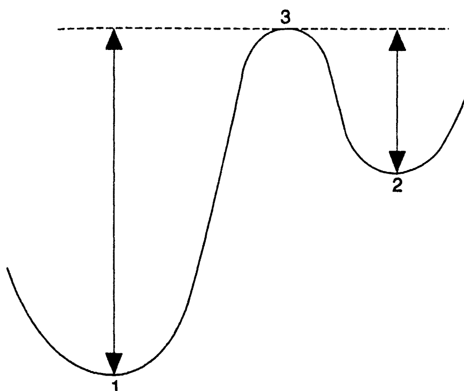
Drugą poprawkę wytłumaczyć jest o wiele trudniej, ponieważ dotyczy pewnych istotnych, lecz skomplikowanych cech struktury poziomów energetycznych. Przejście z jednego na drugi

może zostać uniemożliwione nie tylko z powodu niedostatecznego dopływu energii; *nota bene*, bywa, że niemożliwe jest również przejście z wyższego poziomu na niższy.

Zacznijmy od faktów doświadczalnych. Jak wiadomo z chemii, te same atomy łączyć się mogą ze sobą na różne sposoby, a powstające cząsteczki zwane są izomerami (składają się z takich samych części, po grecku ἴσος – taki sam, μέρος – część). Izomeria nie jest czymś wyjątkowym; im większa cząsteczka, tym więcej może mieć izomerów. Na rycinie 11 przedstawiony został jeden z najprostszych przypadków – dwa rodzaje alkoholu propylowego, z których każdy składa się z 3 atomów węgla (C), 8 wodoru (H) i 1 tlenu (O). Atom tlenu znajdować się może między dowolnym wodorem i węglem, ale z różnymi substancjami mamy do czynienia tylko w dwóch przypadkach przedstawionych na rysunku. Różnią się one pod względem wszystkich swych własności chemicznych i fizycznych, w tym i pod względem energetycznym – przedstawiają różne poziomy.

Otóż obie te cząsteczki są całkowicie trwałe, zachowują się tak, jakby odpowiadały „najniższym poziomom" energetycznym; nie przechodzą też spontanicznie jedna w drugą. Dzieje się tak, ponieważ nie są to konfiguracje sąsiadujące ze sobą. Przejście od jednej do drugiej zachodzi wyłącznie poprzez konfigurację pośrednią, która odpowiada wyższemu poziomowi energetycznemu niż cechuje każdą z nich. Upraszczając sprawę – aby przejście się dokonało, trzeba usunąć atom tlenu z miejsca, które zajmuje, i wprowadzić go w inne. Żeby to uczynić, przejść trzeba przez konfiguracje o znacznie wyższym poziomie energetycznym. Proces ten przedstawia rycina 12: 1 i 2 oznaczają tutaj poziomy energetyczne obu izomerów, 3 – „próg" między nimi, a strzałki wskazują przejścia, czyli niezbędne przemiany energetyczne od 1 do 2, lub w kierunku odwrotnym.

Teraz możemy sformułować już naszą drugą poprawkę, mówiącą o tym, że ze względu na występowanie w procesach biologicznych interesować nas będą wyłącznie przejścia izomeryczne. O nich właśnie myśleliśmy, kiedy (na str. 64–66)



Ryc. 12. Próg energetyczny (3) między poziomami izomerycznymi (1 i 2). Strzałki wskazują minimalne energie przejścia.

mówiliśmy o trwałości cząsteczek. Przeskok kwantowy w tym wypadku polega na przejściu od jednej względnie stabilnej konfiguracji atomów do drugiej, również stabilnej. Potrzebna do tego energia *W* nie jest w tym przypadku równa różnicy poziomów energetycznych izomerów. Jest to energia pozwalająca na przekroczenie „progu" (strzałki na rycinie 12).

Przejścia „bezprogowe" pomiędzy stanem początkowym a końcowym są pozbawione wszelkiego znaczenia, i to nie tylko ze względu na procesy biologiczne. Nie mają nic wspólnego z problemem trwałości cząsteczek, ponieważ nie powodują trwałych skutków. Kiedy zachodzą, są natychmiast neutralizowane przez przejścia w kierunku odwrotnym, nic bowiem nie stoi temu na przeszkodzie.

5

Omówienie i sprawdzenie modelu Delbrücka

Sane sicut lux seipsam et tenebras manifestat, sic veritas norma sui et falsi est.[1]

Spinoza: *Etyka*

Ogólna koncepcja substancji dziedzicznej

Pytanie nasze, jak pamiętamy, brzmiało: czy struktury złożone ze stosunkowo niewielkiej liczby atomów mogą przez dłuższy czas pozostawać odporne na ruch cieplny, na który wystawiona jest substancja dziedziczna? Otóż, z przytoczonych wyżej faktów płynie prosta odpowiedź. Musimy przyjąć, że gen to wielka cząsteczka zdolna tylko do nieciągłej zmiany polegającej na nowym uporządkowaniu wchodzących w jej skład atomów, czyli na powstawaniu jej izomeru.[2] Każde nowe uporządkowanie powstać może tylko w jakimś określonym, niewielkim obszarze genu i w całej cząsteczce dochodzić może do wielu takich nowych uporządkowań. Jeśli przemiana ma być zdarzeniem rzadkim, to progi energetyczne dzielące aktualną konfigurację od możliwych konfiguracji izomerycznych muszą być dość wysokie (w porównaniu ze średnią energią

[1] Zaprawdę, jak światło ujawnia samo siebie i ciemność, tak prawda jest probierzem samej siebie i fałszu. Baruch Spinoza: *Etyka*. Przełożył Ignacy Myślicki. Cz. II tw. XLIII, przypis, s. 121.

[2] Dla wygody mówić będę nadal o przemianach izomerycznych, choć absurdem byłoby wykluczenie możliwości wymiany atomów z otoczeniem.

cieplną atomu). Te rzadkie zdarzenia potraktujemy jako mutacje spontaniczne.

Dalszą część tego rozdziału poświęcę szczegółowej konfrontacji tej ogólnej koncepcji genu oraz mutacji (opracowanej głównie przez niemieckiego fizyka M. Delbrücka) z faktami z zakresu genetyki. Nim jednak to uczynię, celowym będzie sformułowanie kilku uwag o podstawach i istocie tej koncepcji.

Wyjątkowość koncepcji

Czy interesujący nas problem rzeczywiście wymaga zagłębiania się w mechanikę kwantową i szukania w niej podstaw teorii dziedziczenia? Przypuszczenie, że gen to cząsteczka, jest dziś banałem. Niewielu jest biologów, choćby i nieobeznanych z teorią kwantów, którzy by temu przeczyli. Poprzednio przypuszczenie to (str. 62) włożyłem w usta klasycznemu fizykowi, jako jedyne rozsądne wyjaśnienie zaobserwowanej trwałości substancji dziedzicznej. Dalsze rozważania na temat izomerii, progów energetycznych, fundamentalnej roli stosunku W/kT określającego prawdopodobieństwo przemiany izomerycznej – wszystko to wprowadzić można było w oparciu o empirię, bez wdawania się w teorię kwantów. Dlaczego więc tak mocno upieram się przy podejściu kwantowo-mechanicznym, choć faktycznie nie potrafię wyjaśnić go w tej książeczce i grozi mi, że zanudzę wielu Czytelników?

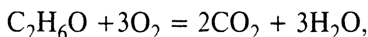
Mechanika kwantowa jest pierwszym teoretycznym podejściem, które wychodząc z zasad fundamentalnych, zdaje sprawę z wszelkich struktur atomowych występujących w przyrodzie. Teoria Heitlera-Londona jest tutaj jednym z jej elementów, lecz nie powstała bynajmniej w celu wyjaśnienia wiązań chemicznych. Zrodziła się w wielce zadziwiający sposób niezależnie od tej kwestii, ze zgoła odmiennych rozważań. Zgadza się przy tym dokładnie z zaobserwowanymi zjawiskami chemicznymi i jest aspektem wyjątkowym, wystarczająco dobrze rozumianym, by powiedzieć z pewnością, że „coś takiego nie może zdarzyć się ponownie" w dalszym rozwoju teorii kwantów.

Możemy więc bez większego ryzyka powiedzieć, że wyjaśnienie zagadnienia substancji dziedzicznej odwoływać się musi do teorii budowy cząsteczki. Nie ma innej możliwości wyjaśnienia jej trwałości. Gdyby model Delbrücka miał zawieść, musielibyśmy zrezygnować z dalszych usiłowań. Tyle chciałem powiedzieć na wstępie.

Pewne tradycyjne nieporozumienia

Można wszakże zapytać: czy rzeczywiście nie istnieją inne oprócz cząsteczek trwałe struktury atomowe? Czyż na przykład złota moneta ukryta w grobowcu nie zachowuje przez tysiąclecia nie zmienionego portretu, jaki został na niej wybity? Prawdą jest, że składa się z niezliczonej liczby atomów, ale przecież w tym przypadku nie będziemy skłonni tłumaczyć trwałości jej kształtu, odwołując się do prawa wielkich liczb. To samo dotyczy kryształów zachowanych bez zmian w skałach przez całe okresy geologiczne.

Prowadzi to nas do drugiej kwestii, jaką chciałbym wyjaśnić. Cząsteczki, ciała stałe i kryształy nie różnią się tak bardzo od siebie. Z punktu widzenia współczesnej wiedzy są one niemal tym samym. Niestety, to, czego nas uczą w szkole, to wiedza od dawna przestarzała, która zaciemnia tylko obraz rzeczywistości i nie pozwala dojść do wniosku, że ze względu na swój stan skupienia cząsteczki bliższe są ciałom stałym niż gazom i cieczom. Przeciwnie, każe się nam starannie odróżniać procesy fizyczne od reakcji chemicznych. Procesem fizycznym jest na przykład topienie się czy parowanie, gdzie cząsteczki nie ulegają zmianom (na przykład alkohol, obojętne, w jakim stanie skupienia, składa się zawsze z cząsteczek C_2H_6O). Reakcją chemiczną jest natomiast na przykład spalanie alkoholu:



$$C_2H_6O + 3O_2 = 2CO_2 + 3H_2O,$$

kiedy to cząsteczka alkoholu i trzy cząsteczki tlenu dają dwie cząsteczki dwutlenku węgla i trzy cząsteczki wody.

O kryształach mówiono nam, że mają postać trójwymiarowych periodycznych sieci i w niektórych – jak w przypadku alkoholu i większości związków organicznych – da się niekiedy rozpoznać pojedyncze cząsteczki, podczas gdy w innych kryształach (np. soli kuchennej – NaCl) cząsteczek nie da się wyróżnić, ponieważ każdy atom sodu (Na) jest symetrycznie otoczony przez sześć atomów chloru (Cl) i *vice versa*, a więc nie sposób powiedzieć, z którym z sześciu atomów Cl sód tworzy cząsteczkę.

Wreszcie wbijano nam do głowy, że ciało stałe może mieć postać krystaliczną, a jeśli jej nie ma, to jest amorficzne.

Rozmaite stany materii

Nie posunę się do twierdzenia, że wszystkie te poglądy i rozróżnienia są błędne. Dla celów praktycznych bywają czasem użyteczne. Gdy jednak chodzi o strukturę materii, rozgraniczenia przeprowadzać należy w inny sposób. Podstawowe rozróżnienie biegnie między dwoma poniższymi „równaniami”:

cząsteczka	= ciało stałe	= kryształ
gaz	= ciecz	= ciało amorficzne

Twierdzenie to wymaga krótkiego wyjaśnienia. Tak zwane amorficzne ciała stałe albo nie są całkiem amorficzne, albo nie są całkiem stałe. Za pomocą promieni rentgenowskich stwierdzono, że amorficzny węgiel drzewny zachowuje rudymentarną strukturę krystalicznego grafitu. Tak więc jest on zarówno ciałem stałym, jak kryształem. Kiedy brak struktury krystalicznej, powinniśmy traktować substancję jako ciecz o wysokiej „lepkości” (tarciu wewnętrznym). O tym, że nie jest to ciało stałe, świadczy brak dokładnej temperatury i ciepła topnienia. Substancja taka, gdy jest ogrzewana, stopniowo mięknie i w sposób ciągły przekształca się w ciecz. (Pamiętam, że pod koniec pierwszej wojny światowej dawano nam w Wiedniu zamiast kawy jakąś substancję przypominającą as-

falt. Była tak twarda, że musiało się użyć dłuta albo siekiery, aby ją pokruszyć na kawałki o łuskowatej strukturze. Zachowywała się jednak jak ciecz, gdy nierozsądnie pozostawiono ją na kilka dni w naczyniu. Wówczas dokładnie wypełniała dolną jego część).

O ciągłych przemianach gazów w ciecze i odwrotnie wiadomo od dawna. Każdy gaz po obejściu tak zwanego punktu krytycznego daje się w sposób ciągły przekształcić w ciecz, kwestii tej nie będziemy tu wszakże omawiać.

Rzeczywiście ważne rozróżnienie

Uzasadniłem powyższy schemat, pomijając dotąd to, co jest najważniejsze, a mianowicie propozycję, by traktować cząsteczki chemiczne jako ciało stałe, czyli kryształ.

Otóż atomy, z których składa się cząsteczka, niezależnie od tego jak wiele ich jest, połączone są ze sobą przez tego samego rodzaju siły, które wiążą ciała stałe i kryształy. Struktura cząsteczki jest równie trwała, jak budowa kryształu. A pamiętajmy, że to właśnie o trwałość struktury chodziło, gdy mowa była o genach!

Rzeczywiście istotne rozróżnienie, gdy chodzi o strukturę materii dotyczy tego, czy wiązania między atomami zapewniają siły Heitlera-Londona. Tak się ma sprawa w ciałach stałych i w cząsteczkach chemicznych, natomiast w gazach jednoatomowych (np. parach rtęci) – nie. W przypadku gazów złożonych z cząsteczek siły te działają tylko między atomami w cząsteczkach, ale nie między poszczególnymi cząsteczkami.

Aperiodyczne ciało stałe

Małe cząsteczki traktować można jako „zarodki" ciał stałych. Istnieją, jak się zdaje, dwa sposoby rozbudowywania ich w coraz to większe układy. Jednym jest powielanie tej samej struktury we wszystkich trzech kierunkach. Tak się dzieje w rosną-

cych kryształach. Z chwilą, gdy ustalona zostanie budowa komórki elementarnej, dalszy rozrost kryształu nie ma teoretycznie granic. Drugim sposobem jest rozbudowa agregatu nie oparta na nudnej, okresowej powtarzalności. Tak się dzieje w przypadku coraz bardziej skomplikowanych cząsteczek substancji organicznych, w których każdy atom czy grupa atomów odgrywa indywidualną rolę (inaczej niż w przypadku struktury periodycznej). W takim przypadku możemy mówić o aperiodycznym ciele stałym lub krysztale i sformułować hipotezę, iż gen, a może i całe włókno chromosomowe[1] – jest aperiodycznym ciałem stałym.

Różnorodność treści gęsto upakowanych w miniaturowym planie rozwoju

Niejednokrotnie zadawano sobie pytanie, jak to jest możliwe, by w tak mikroskopijnej ilości substancji, jaką jest jądro komórki, zakodowany był scenariusz całego przyszłego rozwoju organizmu. Dobrze uporządkowany układ atomów, wystarczająco wytrzymały, by zachować to uporządkowanie, wydaje się jedyną dającą się pomyśleć materialną strukturą umożliwiającą przemiany izomeryczne, i to strukturą wystarczająco pojemną, aby w niewielkiej objętości zawierała skomplikowany system „determinacji". Liczba składających się na nią atomów nie musi być wcale duża, by istniały nieograniczone niemal możliwości ich rozmaitych uporządkowań. Dla ilustracji pomyślmy o alfabecie Morse'a. Dwa rozmaite znaki, kreska i kropka, zestawione maksimum po cztery, pozwalają utworzyć trzydzieści rozmaitych kombinacji. Gdybyśmy natomiast do kreski i kropki dodali trzeci znak i dopuścili kombinacje do dziesięciu znaków, liczba ich możliwych uporządkowań wzrosłaby do 88 572; w przypad-

[1] Że jest ono bardzo elastyczne, nie ma żadnych wątpliwości, podobnie zresztą jak cienki miedziany drucik.

ku 25-znakowych kombinacji z pięciu znaków wyniosłaby 372 529 029 846 191 405.

Można by argumentować, że porównanie to jest ułomne, ponieważ znaki alfabetu Morse'a dają się układać dowolnie (na przykład kropka–dwie kreski lub dwie kropki–kreska) i nie jest to dobre porównanie dla zjawiska izomerii. By zaradzić tej wadzie, przyjmijmy, że dopuszczalne są tylko kombinacje 25-znakowe z pięciu znaków, po pięć każdego (5 kropek, 5 kresek i tak dalej). Daje to w przybliżeniu 623 300 000 000 000 możliwych kombinacji (gdzie zera po prawej stronie oznaczają cyfry, których dokładniej nie chciało mi się policzyć).

Rzecz jasna, w interesującym nas przypadku bynajmniej nie każdemu wyobrażalnemu uporządkowaniu atomów odpowiadać będzie rzeczywista cząsteczka. Co więcej, nie chodzi o arbitralne przyjęcie jakiegokolwiek zakodowanego planu, musi on bowiem być aktywnym czynnikiem przyszłego rozwoju. Z drugiej wszakże strony, przyjęta w naszym przykładzie liczba 25 znaków nie jest wcale zbyt duża, przy czym zakładaliśmy tylko liniowe ich uporządkowania. Przykład nasz miał jedynie zilustrować, że molekularna struktura genu dopuszcza, by miniaturowy plan odpowiadał wielce skomplikowanemu scenariuszowi rozwoju i jednocześnie był narzędziem jego realizacji.

Konfrontacja z faktami: stopień trwałości; nieciągłość mutacji

Najwyższa pora na konfrontację tej wizji teoretycznej z faktami biologicznymi. Pierwsze pytanie dotyczy kwestii, czy może ona rzeczywiście tłumaczyć obserwowaną trwałość substancji dziedzicznej. Czy wartości progowe (duże wielokrotności średniej energii cieplnej kT) dają się pogodzić z tym, co wiadomo z chemii? Pytanie jest trywialne, można odpowiedzieć na nie twierdząco, nie zaglądając nawet do odpowiednich tablic. Cząsteczki każdej substancji, jaką chemik potrafi wyodrębnić w danej temperaturze, muszą być zdolne przetrwać w tej temperaturze przynajmniej kilka minut. (Z reguły są one

o wiele bardziej trwałe). Toteż wartości progowe, z jakimi chemik ma do czynienia, są dokładnie tego rzędu, jakiego wymaga dowolny stopień trwałości substancji, z którymi do czynienia ma biolog. Pamiętamy bowiem (str. 66), że wartości progowe zmieniające się w przedziale 1:2 odpowiadają trwałości od ułamka sekundy do dziesiątek tysięcy lat. Wspomnianym wyżej (str. 66) przykładowo stosunkom

$$W/kT = 30, 50, 60,$$

zapewniającym „czas życia" 1/10 s, 16 miesięcy, 30 tysięcy lat, odpowiadają w temperaturze pokojowej wartości energii progowej 0,9, 1,5 i 1,8 elektronowolta.

Wyjaśnić powinniśmy, co to jest elektronowolt – wielkość dla fizyka wygodna, bo poglądowa. Otóż 1,8 elektronowolta znaczy, że elektron przyśpieszony przez napięcie około 2 woltów uzyska dostateczną energię, by spowodować przejście odpowiadające energii 1,8 elektronowolta. (Dla porównania: bateryjka kieszonkowej latarki ma 3 wolty).

Rozważania te wskazują, iż do pomyślenia jest, by izomeryczna zmiana konfiguracji w jakiejś części cząsteczki chemicznej, spowodowana przez przypadkową fluktuację energii drgań, zdarzała się na tyle rzadko, aby można ją było interpretować jako spontaniczną mutację. W ten sposób, odwołując się do zasad mechaniki kwantowej, można zdać sprawę z najbardziej zadziwiającego faktu dotyczącego mutacji, na jaki zwrócił uwagę de Vries, a mianowicie, że zachodzą one skokowo i nie mają form pośrednich.

Trwałość naturalnie selekcjonowanych genów

Stwierdziwszy, że wszelkiego rodzaju promienie jonizujące przyśpieszają powstawanie mutacji, można by myśleć o przypisaniu naturalnej częstości ich pojawiania się radioaktywności gleby i powietrza oraz promieniowaniu kosmicznemu. Jednakże ilo-

ściowe porównania z wynikami promieniowania rentgenowskiego wskazują, że „naturalne promieniowanie" jest stanowczo zbyt słabe, aby mogło wyjaśnić całość tego naturalnego procesu.

Przyjąwszy, że mamy się odnieść do rzadkości pojawiania się mutacji jako skutku przypadkowych fluktuacji ruchu cieplnego, nie powinno nas dziwić, że przyroda ustanowiła tak subtelne wartości progowe zapobiegające ich częstemu występowaniu. Doszliśmy już przecież poprzednio do wniosku, że częste mutacje byłyby zgubne dla ewolucji. Osobniki, które w wyniku mutacji uzyskiwałyby nie dość trwałą konfigurację genów, miałyby niewielką szansę, by ich szybko mutujące potomstwo przetrwało. Uległoby ono eliminacji, a dobór naturalny wybierałby wewnątrz gatunku osobniki z trwałymi genami.

Niższa niekiedy trwałość mutantów

Nie ma wszakże powodu oczekiwać wysokiej trwałości mutantów pochodzących z eksperymentalnych krzyżówek i selekcjonowanych właśnie jako mutanty w celu badania ich potomstwa. Nie zostały one bowiem jeszcze „wypróbowane" przez dobór, a jeśli zostały, to w przyrodzie uległy eliminacji być może ze względu na nadmierną podatność na mutacje. W każdym razie nie dziwi nas bynajmniej, że niektóre ze zmutowanych genów odznaczają się większą podatnością na mutacje niż normalne, „dzikie" geny.

Temperatura mniej wpływa na nietrwałe niż na trwałe geny

Pozwala to nam sprawdzić nasz wzór:

$$t = \tau e^{W/kT}$$

(przypomnijmy: t to czas oczekiwania na mutację, gdy próg energetyczny wynosi W). Pytamy o zależność t od temperatu-

ry. Z poprzedniego wzoru z łatwością wyprowadzamy przybliżony stosunek czasu w temperaturze $T + 10$ do czasu w temperaturze T:

$$\frac{t(T+10)}{t(T)} \approx e^{\frac{-10W}{kT^2}}.$$

Wykładnik potęgi jest teraz ujemny, a stosunek jest mniejszy od jedności. Wraz ze wzrostem temperatury czas oczekiwania skraca się, a podatność na mutacje rośnie. Zależność tę można sprawdzić, badając muszkę owocową w dopuszczalnym dla niej zakresie temperatur, co też i zrobiono. Na pierwszy rzut oka wynik był zaskakujący. Niska podatność na mutacje „dzikich" genów wyraźnie wzrosła, natomiast stosunkowo wysoka podatność niektórych uprzednio już zmutowanych genów pozostała bez zmian lub wzrosła bardzo nieznacznie. Ale tego właśnie należało oczekiwać na podstawie porównania naszych dwóch wzorów: duża wartość współczynnika W/kT, która, zgodnie z pierwszym wzorem, wyznacza długi czas oczekiwania t (trwały gen), powinna, sądząc z drugiego wzoru, wyznaczać niską wartość określanego w nim stosunku czasów, czyli znacznego wraz z temperaturą wzrostu podatności na mutacje. (Rzeczywista wartość tego współczynnika leży między 1/2 a 1/5. Jego odwrotność, około 2,5, to tak zwany współczynnik van't Hoffa dla zwykłych reakcji chemicznych).

Jak promieniowanie rentgenowskie powoduje mutacje

Wróćmy do mutacji wywoływanych przez promieniowanie rentgenowskie. Na podstawie krzyżówek doświadczalnych wiemy, że: po pierwsze (na podstawie proporcjonalnej zależności między częstością mutacji a dawką promieniowania), mutację wywołuje pojedyncze zdarzenie; po drugie (z ilościowych wyników oraz faktu, że częstość mutacji zależy od łącznej dawki promieniowania, a nie od długości fali), zdarzeniem wywołującym określoną mutację musi być jonizacja lub

jakiś podobny proces zachodzący w objętości będącej sześcianem, o boku równym w przybliżeniu 10 odległościom międzyatomowym. Zgodnie z przedstawioną koncepcją, energia niezbędna do przekroczenia progu pochodzić musi z czegoś w rodzaju „wybuchu", z jonizacji lub wzbudzenia. Mówię o „wybuchu", ponieważ energia pojedynczej jonizacji (wydatkowana nie przez samo promieniowanie rentgenowskie, lecz przez wyzwolony przez nie elektron) jest dobrze znana i wynosi aż 30 elektronowoltów. W obszarze, w którym nastąpiło wyładowanie, energia ta ogromnie wzmaga ruch cieplny i rozchodzi się w postaci „fali cieplnej", to jest fali intensywnych drgań atomów. Nie jest wykluczone, że fala ta dostarczać może niezbędnej energii progowej jednego do dwóch elektronowoltów w zakresie dziesięciu odległości międzyatomowych, choć nie uprzedzony fizyk prawdopodobnie oczekiwałby nieco mniejszego zasięgu oddziaływania. Jak należałoby się spodziewać, a fakty to potwierdzają, w wielu przypadkach wskutek wybuchu dochodzi nie do przekształcenia izomerycznego, lecz do uszkodzenia chromosomu. Staje się ono letalne z chwilą, gdy nie uszkodzony chromosom z drugiego zestawu zostaje w wyniku pomysłowego krzyżowania usunięty i zastąpiony przez inny, którego odpowiedni gen jest również szkodliwy.

Skuteczność promieniowania nie zależy od podatności na spontaniczne mutacje

Na podstawie tej koncepcji łatwo zrozumieć (co nie znaczy przewidzieć) wiele innych właściwości. Tak na przykład nietrwały zmutowany gen bynajmniej nie ulega łatwiej niż trwały mutacjom spowodowanym przez promieniowanie rentgenowskie. Ponadto, w przypadku wybuchu wyzwalającego energię 30 elektronowoltów trudno się spodziewać, by wielkie znaczenie miała różnica, czy energia progowa wynosi 1 czy 1,3 elektronowolta.

Mutacje odwracalne

W niektórych przypadkach zaobserwowano mutacje odwracalne, od „dzikiego" genu do zmutowanego, i z powrotem. W tego rodzaju przypadkach częstość mutacji w obu kierunkach jest czasem taka sama, czasem różna. Na pierwszy rzut oka może to zaskakiwać, ponieważ próg energetyczny w obu kierunkach wydaje się taki sam. Tak jednak być nie musi, albowiem mierzy się go od poziomu energetycznego konfiguracji wyjściowej, a ten może być różny w przypadku „dzikiego" genu i genu zmutowanego. (Por. rycinę 12, na której 1 oznaczać może dziki allel, a 2 – zmutowany, którego trwałość oznaczona jest krótszą strzałką).

W sumie, jak sądzę, model Delbrücka pozostaje w zgodzie z faktami i nic nie przeszkadza, byśmy odwoływali się do niego w dalszych rozważaniach.

6

Porządek, bezład i entropia

Nec corpus mentem ad cogitandum, nec mens corpus ad motum, neque ad quietem, nec ad aliquid (si quid est) aliud determinare potest.

Spinoza: *Etyka*[1]

Doniosły wniosek ogólny płynący z modelu

Wróćmy do kwestii, którą poruszyłem poprzednio (str. 77), gdy tłumaczyłem, że koncepcja genu jako cząsteczki dopuszcza ewentualność, iż miniaturowy plan mógłby jedno-jednoznacznie odpowiadać wielce skomplikowanemu i swoistemu scenariuszowi rozwoju organizmu, a zarazem dostarczać środków jego realizacji. Jak miałoby to się jednak dziać? Jak przejść od przekonania do rozumienia?

Ze względu na swą ogólność cząsteczkowy model Delbrücka nie daje żadnych wskazówek, jak funkcjonuje substancja dziedziczna. Nie spodziewam się, by szczegółowych informacji w tej kwestii dostarczyć mogła w najbliższym czasie fizyka. Postęp, jaki się dokonuje i nadal będzie się niewątpliwie dokonywać, zawdzięczamy biochemii, kierującej się wskazówkami fizjologii i genetyki.

Opis struktury, tak ogólny, jak przedstawiony wyżej, nie pozwala wyciągnąć szczegółowych wniosków dotyczących działania mechanizmu genetycznego. Co do tego nie ma wątpliwości. Mimo to jedno płynące zeń przesłanie da się wypro-

[1] Ani ciało nie może zdeterminować duszy do myślenia, ani dusza ciała do ruchu czy spoczynku, czy czegokolwiek innego (jeśli coś jeszcze jest). Baruch Spinoza: *Etyka*, dz. cyt., cz. III, tw. II, s. 144.

wadzić i przyznać muszę, że tylko dlatego zdecydowałem się napisać tę książeczkę.

Z ogólnego modelu Delbrücka wynika, że materia żywa, choć nie wymyka się ustalonym dotąd prawom fizyki, ujawniać może inne, dotąd nieznane prawa, które, z chwilą gdy zostaną odkryte, staną się równie integralną częścią tej nauki.

Porządek wynikający z porządku

Jest to raczej zawiła linia rozumowania, narażona pod wieloma względami na pomyłki. Wszystkie dalsze rozważania będą miały na celu jej wyjaśnienie. Oto jak przedstawia się, z pewnością nie pozbawiony podstaw, choć wstępny jej zarys.

W rozdziale pierwszym mówiłem, że znane nam prawa fizyki mają charakter statystyczny.[2] Są ściśle związane z naturalną tendencją układów do wzrostu nieuporządkowania, bezładu.

Aby jednak pogodzić znaczną trwałość substancji dziedzicznej z jej mikroskopijnymi rozmiarami, musieliśmy abstrahować od tej tendencji i postulować istnienie niezwykle dużych cząsteczek, będących arcydziełem wysoce zróżnicowanego uporządkowania i chronionych przez czarodziejską różdżkę teorii kwantów. Prawa statystyczne nie zostają przez to unieważnione, ale wynik ich działania ulega modyfikacji. Fizyk wie dobrze, że mechanika kwantowa modyfikuje prawa klasycznej fizyki, zwłaszcza w niskich temperaturach. Znamy wiele na to przykładów, zjawisko życia zaś zdaje się być jednym z nich, i to szczególnie uderzającym. Sprawia ono wrażenie uporządkowanego i podlegającego prawidłowościom zachowania się materii, nie opartego wyłącznie na jej tendencji do wzrostu nieuporządkowania, lecz na istniejącym i utrzymującym się porządku.

[2] Twierdzenie takie, przy podobnym poziomie ogólności względem „praw fizyki", można zapewne podważyć. Omówię tę kwestię w rozdziale siódmym.

Mogę mieć nadzieję, że fizykowi, ale tylko jemu, zdołam wyjaśnić mój pogląd, mówiąc: żywy organizm zdaje się być makroskopowym układem, którego część zachowań zbliżona jest do właściwych wszelkim układom zachowań czysto mechanicznych (w przeciwieństwie do termodynamicznych) wówczas, gdy temperatura zbliża się do zera absolutnego, a cząsteczkowy bezład znika.

Temu, kto fizykiem nie jest, nie jest łatwo uznać, że zwykłe prawa fizyki, które przywykł traktować jako ucieleśnienie dokładności, mogą opierać się na statystycznej tendencji materii do wzrostu bezładu. W rozdziale pierwszym podawałem przykłady. Ogólną zasadą jest tu słynne drugie prawo termodynamiki (zasada wzrostu entropii) i jego równie sławna interpretacja statystyczna. Niżej, zapominając na chwilę o wszystkim, co wiadomo o chromosomach, dziedziczeniu itd., będę starał się wyjaśnić wpływ zasady wzrostu entropii na makroskopowe zachowania żywego organizmu.

Materia żywa wymyka się dążeniu do stanu równowagi

Na czym więc polega swoista cecha życia? Kiedy możemy powiedzieć o układzie materialnym, że jest żywy? Wówczas gdy „czyni" on coś, porusza się, wymienia materię z otoczeniem itp., i to przez czas dłuższy niż moglibyśmy się tego spodziewać w przypadku materii nieożywionej w analogicznych okolicznościach. Gdy układ nieożywiony jest izolowany lub kiedy znajduje się w jednorodnym otoczeniu, wszelki ruch w nim wkrótce ustaje w wyniku różnego rodzaju tarcia. Wskutek przewodnictwa ciepła wyrównaniu ulega temperatura oraz różnice potencjałów elektrycznych i chemicznych. Proces tworzenia związków chemicznych dobiega końca, a cały układ staje się wreszcie martwym, bezwładnym kawałkiem materii. Jest to stan trwały, nie zachodzą w nim żadne obserwowalne zdarzenia. Fizycy nazywają go stanem równowagi termodynamicznej bądź „maksymalnej entropii".

Praktycznie stan ten osiągany jest zazwyczaj bardzo szybko. Teoretycznie zaś nie jest to jeszcze zazwyczaj stan absolutnej równowagi, czy też maksymalnej entropii. Ale zbliżanie się do owej granicy następuje teraz bardzo powoli. Trwać może godzinami, latami, a nawet przez stulecia. Oto przykład, kiedy zbliżanie się do tego stanu przebiega jeszcze dość szybko. Jeśli szklankę z czystą wodą i drugą – z wodą osłodzoną – umieścić w hermetycznie zamkniętym pojemniku o stałej temperaturze, początkowo wydaje się, że nic się nie dzieje, że mamy do czynienia ze stanem pełnej równowagi. Po kilkudziesięciu mniej więcej godzinach zauważyć można, że czysta woda, wskutek wyższego ciśnienia jej pary, stopniowo paruje i skrapla się w szklance z roztworem. Słodka woda wylewa się powoli ze swojego naczynia. Dopiero gdy cała czysta woda odparuje, będziemy mieli do czynienia z jednorodnym roztworem cukru w całej objętości wody znajdującej się w pojemniku.

Takiego stopniowego zbliżania się do stanu równowagi nie należy mylić z życiem, i zjawiska takie możemy pominąć. Wspominam o nich tylko dlatego, by nie być posądzonym o nieścisłość.

Zasilanie „ujemną entropią"

Jeśli organizm wydaje się czymś zagadkowym, to dlatego, że nie popada szybko w bezładny stan równowagi. Z tego właśnie powodu ludzie od najdawniejszych czasów myśleli, a czasem myślą nawet i dziś, iż działa w nim jakaś niefizyczna siła nadprzyrodzona (*vis viva, entelechia*).

W jaki sposób organizm żywy unika zamierania? Oczywiście dzięki temu, że je, pije, oddycha (a w przypadku roślin – asymiluje). Nazywa się to metabolizmem. Greckie słowo μεταβάλλειν oznacza „zmianę" lub „wymianę", ale wymianę czego? Pierwotnie sądzono, ze chodzi o wymianę materii. (Stąd też niemiecki termin *Stoffwechsel*[3], oznaczający meta-

[3] Przemiana materii (przyp. tłum.).

bolizm). Absurdem jest jednak sądzić, że na tym polega istota tego procesu. Wszystkie atomy tlenu, azotu, siarki itd. są sobie całkiem równoważne, toteż z ich wymiany nic nie może wyniknąć. Przez pewien czas ciekawość naszą zaspokajało przekonanie, że żywimy się energią. W niektórych krajach (nie pamiętam, czy chodzi o Stany Zjednoczone, czy o Niemcy) na jadłospisach w restauracjach podawano przy każdym daniu nie tylko cenę, ale również jego równowartość energetyczną. W sensie dosłownym jest to oczywiście także absurd. Zasoby energetyczne dorosłego organizmu są równie stałe, jak zasoby materialne. Ponieważ jedna kaloria jest tyleż warta, co każda inna, trudno pojąć, co dawałaby wymiana.

Cóż zatem takiego tajemniczego i cennego zawiera pożywienie zapobiegające śmierci? Odpowiedź jest prosta. Każdy proces czy zdarzenie, mniejsza o nazwę, wszystko, co dzieje się w przyrodzie, prowadzi do wzrostu entropii w tej przestrzeni, w której się odbywa. Tak więc każdy żywy organizm produkuje dodatnią entropię i entropia jego stale wzrasta. Zbliża się tym samym do stanu maksymalnej entropii, czyli do śmierci. trzymać się przy życiu może zaś tylko dzięki temu, że pobie- z otoczenia ujemną entropię, która – jak za chwilę się prze- namy – jest dla niego czymś pozytywnym. To ona go zasila. Wyrażając się w sposób mniej paradoksalny, powiemy, że istotą metabolizmu jest pozbywanie się przez organizm entropii, którą – póki żyje – musi nieuchronnie produkować.

Czym jest entropia?

Czym jest więc entropia? Muszę z naciskiem powiedzieć, że nie jest to mglista koncepcja czy pojęcie, lecz wymierna wielkość fizyczna, tak jak długość prętu, temperatura w każdym punkcie ciała, ciepło topnienia danego kryształu, czy też ciepło właściwe dowolnej substancji. W temperaturze absolutnego zera (–273°C) entropia dowolnej substancji równa się zeru. Kiedy stopniowo, małymi odwracalnymi krokami przeprowadzamy substancję w jakiś inny stan (choćby powodowało to

zmianę jej chemicznych lub fizycznych własności, lub rozkład na inne pod względem fizycznym czy chemicznym substancje), entropia rośnie. Jej wzrost można obliczyć, dzieląc nieskończenie małe przyrosty ciepła dostarczanego w toku takiej procedury przez absolutną temperaturę, w jakiej to się dzieje, i sumując wszystkie te wielkości. Tak na przykład, kiedy ciało stałe ulega topnieniu, entropia wzrasta o ilość doprowadzonego ciepła podzieloną przez temperaturę w punkcie topnienia. Tak jak kaloria (cal) jest jednostką ciepła, a centymetr – długości, tak jednostką entropii jest cal/°C.

Statystyczna interpretacja entropii

Wprowadziłem techniczną definicję entropii tylko w tym celu, by rozproszyć atmosferę tajemniczości towarzyszącą temu pojęciu. O wiele ważniejsze będzie wyjaśnienie ustalonego przez Boltzmanna i Gibbsa związku pojęcia entropii ze statystycznymi koncepcjami porządku i chaosu. Również i ta zależność znajduje ilościowy wyraz we wzorze: entropia = $k \log D$, gdzie k to stała Boltzmanna ($=3{,}2983 \times 10^{-24}$ cal/°C), natomiast D to ilościowa miara nieuporządkowania atomów w danym ciele. Dokładne wyjaśnienie sensu wielkości D w języku potocznym jest raczej niemożliwe. Nieuporządkowanie atomów, na jakie D wskazuje, to po części wynik ruchu cieplnego, a po części – zmieszania różnego rodzaju atomów lub cząsteczek, na przykład cząsteczek cukru i wody w roztworze, o czym była niedawno mowa. Przykład tamten dobrze ilustrował równanie Boltzmanna: nieuporządkowanie wzrasta w wyniku stopniowego mieszania się cząsteczek cukru i wody, a ponieważ logarytm D rośnie wraz z D, rośnie też i entropia. Jest również rzeczą jasną, że każdy przyrost ciepła wzmaga chaotyczny ruch cieplny, a tym samym wzrasta D i entropia. Szczególnie dobitnym przykładem może tu być topnienie kryształu, naruszające jego periodyczną strukturę atomową czy też cząsteczkową: zamiast uporządkowanej sieci krystalicznej mamy nieuporządkowany, stale zmieniający się rozkład atomów.

W układzie izolowanym bądź znajdującym się w jednorodnym środowisku (w przypadku naszych rozważań najlepiej traktować takie środowisko jako część rozpatrywanego układu) entropia rośnie, a układ szybciej lub wolniej zdąża do bezładnego stanu maksymalnej entropii. Przekonujemy się więc, że to fundamentalne prawo fizyki wyraża naturalne dążenie układów (o ile pozostawiamy je samym sobie) do stanu chaosu, tak jak to się dzieje z książkami w bibliotece lub stosem rękopisów na biurku. (Odpowiednikiem chaotycznego ruchu cieplnego jest w tym przypadku nasze posługiwanie się tymi przedmiotami bez troski, aby odłożyć je na miejsce).

Utrzymywanie porządku kosztem otoczenia

Jak wytłumaczyć w kategoriach teorii statystycznej zadziwiającą zdolność organizmów żywych do opóźniania procesu przechodzenia w stan równowagi termodynamicznej (czyli śmierci)? Organizm, jak powiedzieliśmy poprzednio, „syci się ujemną entropią"; ujemna entropia, wchłaniana z otoczenia, równoważy wzrost entropii, powodowany przez wewnętrzne procesy życiowe, i tym samym utrzymuje go w stanie stosunkowo niskiej entropii.

Jeśli D jest miarą nieuporządkowania, to odwrotność ($1/D$) traktować można jako bezpośrednią miarę porządku. Ponieważ zaś logarytm $1/D$ równa się ujemnemu logarytmowi D, to równanie Boltzmanna zapisać możemy następująco:

$$-(\text{entropia}) = k \log(1/D).$$

W rezultacie dziwne wyrażenie „ujemna entropia" zastąpić można przez entropię z minusem i traktować jako miarę porządku. Sposób, za którego pośrednictwem organizm utrzymuje się w stacjonarnym stanie stosunkowo wysokiego uporządkowania (niskiej entropii), polega zatem na stałym „syceniu się" porządkiem otoczenia. Wniosek ten bynajmniej

nie jest tak paradoksalny, jak to się może wydawać. Przeciwnie, uchodzić może za trywialny. Istotnie, w wypadku zwierząt wyższych wiemy dobrze, jakim to rodzajem porządku karmią się one, pobierając wysoce uporządkowaną materię w postaci mniej lub bardziej złożonych związków organicznych stanowiących ich pożywienie. Po wykorzystaniu ich wydalają je w postaci zdegradowanej, jednak nie na tyle, by nie mogły służyć za pożywienie roślinom. (Dla nich z kolei najważniejszym źródłem ujemnej entropii jest światło słoneczne).

Uwaga do rozdziału 6

Powyższe uwagi na temat ujemnej entropii spotkały się z krytyką i sprzeciwem moich kolegów fizyków. Niech mi wolno będzie powiedzieć z tego miejsca, że gdybym zwracał się wyłącznie do nich samych, mówiłbym raczej o energii swobodnej, jest to bowiem termin zazwyczaj używany w tym kontekście. Jednakże ten wysoce techniczny termin wydawał mi się pod względem językowym zbyt bliski pojęciu energii, by niewprowadzony czytelnik nie mylił ich obu ze sobą. Obawiałem się, że weźmie on określenie „swobodna" za nieznaczący *epitheton ornans*, podczas gdy faktycznie chodzi tu o pojęcie dość zawiłe, a jego związek z zasadą Boltzmanna trudniej jest wyjaśnić niż pojęcia entropii ze znakiem ujemnym. *Nota bene* nie jest to mój pomysł: na nim opierało się oryginalne rozumowanie samego Boltzmanna.

F. Simon wszakże trafnie zwrócił mi uwagę, że moje proste rozważania termodynamiczne nie tłumaczą, dlaczego mielibyśmy się żywić „wysoce uporządkowaną materią w postaci mniej lub bardziej złożonych związków organicznych", a nie węglem drzewnym lub sproszkowanymi diamentami. Nie-specjaliście muszę wszakże wyjaśnić, że kawałek węgla czy diament wraz z ilością tlenu niezbędnego do ich spalenia to przecież również z fizycznego punktu widzenia układ wysoce uporządkowany. W wyniku reakcji spalania węgla powstaje znaczna ilość ciepła. Układ, oddając je do otoczenia, wyzbywałby się w wyniku reakcji znacznego przyrostu entropii i osiągał z grubsza jej uprzedni poziom.

Nie możemy jednak żywić się dwutlenkiem węgla powstałym w wyniku reakcji chemicznej. Toteż Simon ma rację, wskazując, że zawartość energetyczna pożywienia nie jest bez znaczenia, a moje naigrywanie się z restauracyjnych menu było nie na miejscu. Energia niezbędna jest, aby uzupełniać nie tylko wydatek energii mechanicznej w toku rozmaitych czynności, lecz również ciepło, jakie stale oddajemy do otoczenia. A wydatkowanie ciepła nie jest bynajmniej czymś nieistotnym – jest to bowiem właśnie sposób, w jaki wyzbywamy się nadmiaru entropii powstającej stale w wyniku fizycznych procesów życiowych.

Zdaje się to sugerować, że wyższa temperatura zwierząt ciepłokrwistych pozwala im szybciej wyzbywać się entropii, a tym samym umożliwia bardziej intensywne procesy życiowe. Nie wiem, na ile przypuszczenie to (moje, a nie Simona) jest słuszne. Można bowiem twierdzić, że wiele zwierząt ciepłokrwistych pokrytych jest futrem lub piórami, co chroni je przed szybką utratą ciepła. Toteż sugerowaną przeze mnie zależność między temperaturą ciała a „intensywnością procesów życiowych" można wyjaśnić bardziej bezpośrednio w oparciu o wspomniane uprzednio (str. 80) prawo van't Hoffa: wyższa temperatura przyśpiesza reakcje chemiczne, z którymi związane są procesy życiowe. (Znalazło to doświadczalne potwierdzenie w przypadku gatunków pobierających ciepło z otoczenia).

7

Czy podstawą życia są prawa fizyki?

Si un hombre nunca se contradice, será porque nunca dice nada.[1]

Miguel de Unamuno (w rozmowie prywatnej)

W poszukiwaniu nowych praw rządzących organizmami

W tym ostatnim już rozdziale chcę pokrótce wykazać, że ze wszystkiego, czego dowiedzieliśmy się o budowie materii ożywionej, wynika, iż nie powinniśmy się spodziewać, by jej funkcjonowanie dało się sprowadzić do zwykłych praw fizyki. I to nie dlatego, by istniała jakaś „nowa siła" rządząca zachowaniem pojedynczych atomów w organizmie żywym, lecz ponieważ ich budowa różni się od wszystkiego, z czym mieliśmy dotąd do czynienia w laboratorium fizycznym. By rzecz ująć skrajnie: inżynier zajmujący się jedynie maszynami cieplnymi, po zapoznaniu się z budową silnika elektrycznego stwierdzi, że zasady jego działania są dlań niezrozumiałe. Odnajdzie w nim znaną mu skądinąd miedź, z której sporządzone są przewody uzwojenia, oraz żelazo w postaci rdzenia. Będzie słusznie przekonany, że jest to taka sama miedź i takie samo żelazo, z jakich wykonane były części maszyny parowej, kocioł, dźwignie i przekładnie, i że podlegają one tym samym prawom przyrody. Różnica konstrukcji każe mu się natomiast spodziewać zupełnie innego sposobu funkcjonowania. Nie będzie wcale sądził, że silnik elektryczny poruszany jest przez jakiegoś ducha, dlatego że uruchamia go przekręcenie wyłącznika, a nie ciśnienie pary z kotła.

[1] Jeśli człowiek nigdy sobie nie przeczy, to tylko dlatego, że nigdy nic nie mówi.

Raz jeszcze o sytuacji w biologii

Następstwo zdarzeń cyklu życiowego organizmu wykazuje niezwykłą regularność i uporządkowanie przewyższające wszystko, z czym mieliśmy do czynienia w świecie nieorganicznym. Decydują o tym wysoce uporządkowane grupy atomów, stanowiące znikomą część tych, z których składa się komórka. Ponadto, z poglądu, jaki wyrobiliśmy sobie na temat powstawania mutacji, wynika, że przemieszczenia nielicznych atomów, wchodzących w skład owych „grup decydujących" w komórce rozrodczej, wystarczają, by spowodować określoną zmianę makroskopowych cech dziedzicznych organizmu.

Są to niewątpliwie najbardziej interesujące fakty, jakie ujawniła nam współczesna nauka. Nie musimy traktować ich z niedowierzaniem. Zadziwiająca zdolność organizmu do utrzymywania wewnętrznego porządku i niepopadania w atomowy bezład, zdolność „sycenia się" uporządkowaniem przychylnego otoczenia wydaje się związana z obecnością „aperiodycznych ciał stałych", to jest cząsteczek chromosomu będących – ze względu na rolę, jaką pełnią w nich poszczególne atomy i rodniki – najlepiej uporządkowanymi strukturami atomowymi, jakie w ogóle znamy; lepiej nawet niż zwykłe kryształy o budowie periodycznej.

Krótko mówiąc, przekonujemy się, że istniejący porządek odznacza się zdolnością do samozachowania i do powodowania zdarzeń uporządkowanych. Brzmi to dość wiarygodnie, choć dając temu wiarę, odwołujemy się niewątpliwie do wiedzy o strukturach społecznych oraz o innych zdarzeniach, jakie pociąga za sobą działalność organizmów żywych. Toteż może się wydawać, że rozumowanie to ma charakter błędnego koła.

Podsumowanie sytuacji w fizyce

Jakkolwiek rzecz by się miała, muszę dobitnie podkreślić, że dla fizyka taki stan rzeczy jest nie tylko niewiarygodny, ale nader zadziwiający, bezprecedensowy. Wbrew potocznemu mniemaniu, regularny przebieg zdarzeń podlegających prawom fizyki nigdy nie jest skutkiem jednej dobrze uporządkowanej konfiguracji atomów, o ile konfiguracja ta nie powtarza się wielokrotnie, jak dzieje się w kryształach o budowie periodycznej, bądź w cieczy albo gazie, składających się z wielkiej liczby identycznych cząsteczek.

Nawet wówczas, gdy chemik manipuluje bardzo skomplikowaną cząsteczką *in vitro*, ma on do czynienia z ogromną liczbą takich samych cząsteczek. Ich to dotyczą formułowane przez niego prawa. Może na przykład powiedzieć, że w ciągu pierwszej minuty uległa reakcji połowa jej cząsteczek, a po następnej – trzy czwarte. Nie może wszakże przewidzieć, czy konkretna cząsteczka (zakładając, że potrafi on śledzić jej losy) ulegnie w tym czasie reakcji, czy nie. Jest to bowiem zdarzenie czysto przypadkowe.

Nie jest to kwestia tylko teoretyczna. Nie chodzi o to, że nie możemy śledzić losów pojedynczego atomu, czy też niewielkiej ich grupy. Czasem jest to możliwe. Ilekroć jednak potrafimy, stwierdzamy nieregularność, a prawidłowość jest wynikiem uśrednienia. Z przykładem takim mieliśmy do czynienia w rozdziale pierwszym. Ruchy Browna maleńkiej cząstki zawieszonej w cieczy są całkowicie nieregularne. Kiedy jednak cząstek jest wiele, wynikiem ich bezładnych ruchów jest uporządkowane zjawisko dyfuzji.

Rozpad pojedynczego atomu pierwiastka promieniotwórczego jest zjawiskiem obserwowalnym: pocisk, jaki zostaje wyrzucony, powoduje scyntylację na ekranie fluorescencyjnym. Jeśli jednak mamy do czynienia z pojedynczym promieniotwórczym atomem, jego prawdopodobny czas życia jest o wiele mniej pewny niż zdrowego wróbla. Niepodobna tu powie-

dzieć niczego więcej jak to, że szansa jego rozpadu w każdej następnej sekundzie, obojętne jak wielka jest ta szansa, pozostaje taka sama, choćby atom miał trwać i tysiąc lat. A jednak ten brak determinacji pojedynczego zdarzenia znajduje wyraz w ścisłym prawie wykładniczym, jakiemu podlega proces promieniotwórczego rozpadu dużej liczby atomów tego samego rodzaju.

Uderzający kontrast

Z zupełnie inną sytuacją mamy do czynienia w biologii. Pojedyncza grupa atomów, istniejąca w jednej tylko kopii, powoduje uporządkowane zdarzenia, które na mocy ścisłych praw wyśmienicie zgrane są ze sobą i z otoczeniem. Powiedziałem: „istniejąca w jednej tylko kopii", mając na myśli komórkę jajową i organizm jednokomórkowy. W przypadku organizmów wyższych kopii jest oczywiście więcej. Jak dużo? Mniej więcej 10^{14} w przypadku dorosłego ssaka. Cóż to jest! Jedna milionowa liczby cząsteczek zawartych w jednym calu sześciennym powietrza. Nawet zebrane wszystkie razem tworzyłyby tylko maleńką kropelkę cieczy. A przecież są one rozproszone – każda komórka zawiera tylko jedną kopię (lub dwie w przypadku komórek diploidalnych). Czy – zważywszy władzę, jaką w każdej pojedynczej komórce ma jej urząd centralny – każdy z nich nie przypomina rozproszonych po całym organizmie agencji władzy lokalnej, komunikujących się ze sobą łatwo dzięki kodowi, który jest im wspólny?

Jest to z pewnością porównanie fantastyczne, które przystoi raczej poecie niż uczonemu. Nie trzeba jednak poetyckiej wyobraźni, lecz tylko rygorystycznego rozumowania naukowego, by uznać, że mamy w sposób oczywisty do czynienia ze zdarzeniami, których prawidłowe następstwo jest skutkiem „mechanizmu" zasadniczo różnego od „probabilistycznych praw" fizyki. Zwykła obserwacja potwierdza bowiem, iż mechanizm sprawczy w każdej komórce ucieleśniony jest w konfiguracji atomów, istniejących tylko w jednej kopii (czasem

w dwóch), i że wywołuje on zdarzenia będące wzorem uporządkowania. Niezależnie od tego, czy zadziwia to nas, czy też wydaje się całkiem wiarygodne, że niewielka, wysoce uporządkowana grupa atomów działać może w taki sposób, sytuacja ta jest bezprecedensowa, nie spotykamy się bowiem z czymś takim nigdzie indziej poza materią żywą. Fizyk czy chemik badający materię nieorganiczną nigdy nie stanął wobec zjawisk, które zmuszony by był interpretować w taki sposób. Toteż zjawisk tych nie obejmują nasze piękne teorie statystyczne, które – z czego jesteśmy tak dumni – pozwoliły nam zajrzeć za kulisy i dostrzec, że podstawą ścisłego porządku dokładnych praw fizycznych jest bezład zdarzeń atomowych i cząsteczkowych. Teorie te pozwoliły nam także przekonać się, że najważniejsze, najogólniejsze prawo fizyki, prawo wzrostu entropii, można zrozumieć bez żadnych specjalnych hipotez przyjmowanych *ad hoc*, albowiem nie jest ono niczym więcej, jak tylko wyrazem cząsteczkowego bezładu.

Dwa sposoby uzyskiwania porządku

Porządek procesów życiowych ma inne źródło. Wydaje się, że może on być wynikiem działania dwojakiego rodzaju mechanizmów. Po pierwsze, statystycznego – tworzącego „porządek z bezładu", i po drugie, nowego – produkującego „porządek z porządku". Umysłowi nieuprzedzonemu ten drugi sposób wydaje się znacznie prostszy i bardziej wiarygodny. I tak jest w istocie. Dlatego też fizycy byli tak dumni z odkrycia mechanizmu wyjaśniającego powstawanie „porządku z bezładu"; mechanizm ten pozwala zrozumieć bieg zdarzeń przyrody, przede wszystkim ich nieodwracalność. Nie możemy jednak oczekiwać, by „prawa fizyki" oparte na tej zasadzie wystarczały do wyjaśnienia zachowań materii żywej, której najbardziej swoiste cechy wynikają w znacznym stopniu z zasady „porządek z porządku". Trudno oczekiwać, by dwa zasadniczo odmienne mechanizmy warunkowały tego samego rodzaju pra-

wa: nie spodziewam się przecież, by klucz do mojego mieszkania otwierał również drzwi sąsiada. Toteż nie powinniśmy popadać w desperację z powodu kłopotów związanych z wyjaśnianiem zjawisk życia na podstawie zwykłych praw fizyki. Posiadana wiedza o budowie materii każe bowiem spodziewać się nowych praw. Powinniśmy być przygotowani do odkrycia prawa fizycznego nowego rodzaju, leżącego u podstaw fizyki. Przecież nie nazwiemy go nie-fizycznym, a tym bardziej nadprzyrodzonym.

Nowa zasada nie jest obca fizyce

Nie postąpimy tak, ponieważ ta nowa zasada ma, jak sądzę, zasadniczo fizyczny charakter: wywodzi się po prostu z teorii kwantów. Aby to wyjaśnić, niezbędna jest pewna dygresja, wnosząca uściślenie, a dokładniej mówiąc, poprawkę do mego uprzedniego twierdzenia, iż wszystkie prawa fizyki mają podłoże statystyczne.

Twierdzenie to, nieustannie powtarzane, prowadzi nieuchronnie do sprzeczności. Istnieją bowiem zjawiska, których cechy oparte są w sposób widoczny na zasadzie „porządek z porządku" i zdają się nie mieć nic wspólnego ze statystyką atomowego bezładu.

Uporządkowany ruch planet Układu Słonecznego trwa niemal odwiecznie. Dzisiejsze położenia ciał niebieskich są konsekwencją ich położeń w dowolnie odległej przeszłości; można je obliczyć na podstawie dzisiejszych i *vice versa*. Obliczenia niegdysiejszych zaćmień zgodne są ze źródłami historycznymi, a w niektórych przypadkach mogą być pomocne do uściślenia przyjętej chronologii. Nie zakładają żadnej statystyki, a tylko sformułowane przez Newtona prawo powszechnego ciążenia.

Ze statystyką nie ma również nic wspólnego regularny ruch dobrego zegara, czy też jakiegoś analogicznego mechanizmu. Krótko mówiąc, wszystkie zjawiska mechaniczne płyną wyraźnie i bezpośrednio z zasady „porządek z porządku", przy czym termin „mechaniczne" należy brać w najszerszym

sensie tego słowa. Jak wiadomo, podstawą działania precyzyjnego zegara może być stała częstotliwość prądu elektrycznego. Przypominam sobie interesujący artykuł Maxa Plancka pt. „Dynamische und Statistische Gesetzmässigkeit" („Prawidłowości dynamiczne i statystyczne"). Chodzi w nim dokładnie o to samo rozróżnienie, co między moimi zasadami „porządek z porządku" i „porządek z bezładu". Celem artykułu było wykazanie, jak ciekawe prawa statystyczne, rządzące zjawiskami makroskopowymi, rodzą się z praw „dynamicznych", mających rzekomo rządzić zdarzeniami makroskopowymi, to jest oddziaływaniami pojedynczych atomów i cząsteczek.[2]

Znaczyłoby to, że „nowa" zasada, „porządek z porządku", do której odwoływałem się jako do klucza pozwalającego zrozumieć procesy życia, bynajmniej nie jest czymś nowym w fizyce. Planck przyznawał jej nawet priorytet. Dochodzimy więc do pozornie absurdalnego wniosku, że u podłoża procesów życiowych leży mechanizm zegarowy, tak jak go rozumiał Planck. Wniosek ten nie jest jednak absurdalny i, moim zdaniem, nie całkiem błędny, co nie znaczy, że nie należy traktować go ze znaczną dozą sceptycyzmu.

Ruch zegara

Rozważmy dokładniej ruch rzeczywistego zegara. Nie jest to proces czysto mechaniczny, o czym świadczy fakt, że zegar trzeba nakręcać. W przeciwnym razie raz puszczony w ruch chodziłby wiecznie. Rzeczywisty zegar bez sprężyny zatrzymuje się po kilku ruchach wahadła, jego energia mechaniczna przekształca się w ciepło. Jest to niezmiernie skomplikowany proces atomowy. Jego fizyczne wyjaśnienie zmusza do uznania, iż nie jest to proces w pełni odwracalny. Zegar pozbawio-

[2] Max Planck był zwolennikiem determinizmu fizycznego i sądził, że prawa statystyczne mają deterministyczne podłoże. E. Schrödinger, wbrew ogromnej większości współczesnych mu fizyków, szedł niewątpliwie jego tropem (przyp. tłum.).

ny sprężyny mógłby nagle zacząć chodzić kosztem energii cieplnej jego trybów oraz otoczenia. W tej sytuacji fizyk musiałby powiedzieć: w zegarze doszło do niezwykłej intensyfikacji ruchów Browna. W rozdziale drugim (str. 28–29) mówiłem, że bardzo czuła waga uchylna (elektrometr lub galwanometr) wskazuje, iż coś takiego dzieje się nieustannie. W przypadku zegara jednak jest to niezwykle mało prawdopodobne.

Kwestia, czy (posługując się terminologią Plancka) przypiszemy ruch zegara prawidłowym zdarzeniom statystycznym, czy dynamicznym, zależy od naszego podejścia. Traktując go jako zjawisko dynamiczne, bierzemy pod uwagę przede wszystkim jego regularny ruch, który zapewnia stosunkowo słaba sprężyna, przezwyciężająca zakłócenia powodowane przez ruch cieplny, dzięki czemu możemy go pominąć. Jeśli jednak pamiętamy, że zegar bez sprężyny musiałby wskutek tarcia stanąć, to zmuszeni będziemy potraktować jego ruch jako zjawisko o podłożu statystycznym.

Jakkolwiek znikome byłyby z praktycznego punktu widzenia efekty cieplne ruchu zegara, nie ulega wątpliwości, że to drugie podejście, które je uwzględnia, jest bardziej zasadnicze, nawet gdy mamy do czynienia z regularnym ruchem zegara wyposażonego w sprężynę. Nie należy bowiem sądzić, że mechanizm poruszający znosi statystyczny charakter procesu. Jego ścisłe ujęcie fizyczne dopuszcza możliwość, że nawet regularnie chodzący zegar może kiedyś odwrócić swój bieg i kosztem energii cieplnej otoczenia sam nakręcić własną sprężynę. Zdarzenie takie jest „jeszcze mniej prawdopodobne” niż uruchomienie zegara całkiem pozbawionego mechanizmu wskutek intensyfikacji ruchów Browna w jego obrębie.

Zegar mimo wszystko statystyczny

Podsumujmy. Prosty przypadek zegara, jaki rozważyliśmy, jest typowy dla wszystkich zjawisk, które zdają się wymykać powszechnej zasadzie statystycznej teorii ruchu cząsteczek. Zegary zbudowane z rzeczywistych substancji fizycznych

(w przeciwieństwie do „pomyślanych") nie są „prawdziwymi" mechanizmami zegarowymi. Przypadkowość ich funkcjonowania może zostać w większym lub mniejszym stopniu zredukowana, prawdopodobieństwo, że nagle zaczną źle chodzić – zminimalizowane, ale nigdy nie zostaje ono sprowadzone do zera. Nawet w przypadku ciał niebieskich nie brakuje skutków tarcia i wymiany ciepła. Tarcie przypływów i odpływów stopniowo hamuje ruch Ziemi, co w konsekwencji powoduje stopniowe oddalanie się od niej Księżyca; nie miałoby to miejsca, gdyby Ziemia była idealnie sztywną kulą.

Mimo to faktem pozostaje, że „fizyczne mechanizmy zegarowe" wyraźnie odznaczają się cechami uwarunkowanymi przez zasadę „porządek z porządku"; zasadę, która wzbudziła zakłopotanie fizyków, gdy zetknęli się z nią w organizmach żywych. Niewykluczone, że obydwa te przypadki mają ze sobą coś wspólnego. Trzeba zatem rozważyć, co może je łączyć i na czym polega owa uderzająca między nimi różnica, która sprawia, że organizm żywy jest czymś zupełnie nowym i bezprecedensowym.

Twierdzenie Nernsta

Zapytajmy: kiedy układ fizyczny, to jest dowolna konfiguracja atomów, podlega prawom dynamicznym (w rozumieniu Plancka), czyli funkcjonuje jak mechanizm zegarowy? Teoria kwantów dostarcza nader zwięzłej odpowiedzi na to pytanie: w temperaturze zera absolutnego. Im bliżej zera absolutnego, tym bezładny ruch cząsteczek ma mniejszy wpływ na zjawiska fizyczne. Fakt ten *nota bene* stwierdzony został nie jako wniosek z teorii, lecz na podstawie dokładnego śledzenia reakcji chemicznych w szerokim zakresie temperatur i ekstrapolacji wniosków do temperatury zera absolutnego, której nie sposób praktycznie uzyskać. Jest to słynne twierdzenie Waltera Nernsta, zwane często i nie bez racji „trzecią zasadą termodynamiki". (Pierwsza mówi o zachowaniu energii, druga zaś – o wzroście entropii).

Teoria kwantów dostarcza racjonalnego uzasadnienia empirycznemu prawu Nernsta oraz pozwala oszacować, na ile temperatura bliska być musi absolutnego zera, by układ zachowywał się w przybliżeniu „dynamicznie". Jaka mianowicie temperatura w każdym konkretnym przypadku jest praktycznie równoważna absolutnemu zeru?

Otóż bynajmniej nie jest tak, że musi to być zawsze bardzo niska temperatura. W istocie rzeczy Nernst doszedł do sformułowania swego prawa, stwierdzając, że nawet w temperaturze pokojowej entropia odgrywa zadziwiająco niewielką rolę w przebiegu niektórych reakcji chemicznych. (Przypomnę, że entropia jest bezpośrednią miarą atomowego bezładu).

Zegar wahadłowy w temperaturze bliskiej zera

Jak to wygląda w przypadku zegara wahadłowego? Otóż temperatura pokojowa jest dlań praktycznie równoważna zeru absolutnemu. Dlatego właśnie funkcjonuje on „dynamicznie" i gdybyśmy obniżali temperaturę, działać tak będzie dalej (pod warunkiem, że usuniemy zeń wszelkie ślady oliwienia). Nie będzie jednak działać w ten sposób, jeśli podniesiemy temperaturę – w końcu bowiem zacznie się topić.

Mechanizm zegarowy a organizm

Aczkolwiek wszystko to brzmi nader banalnie, dotykamy kwestii zasadniczej. Mechanizmy zegarowe mogą funkcjonować „dynamicznie", ponieważ zbudowane są z ciał stałych, w których siły Londona-Heitlera są dostatecznie duże, by zniwelować skutki ruchu cieplnego w zwykłej temperaturze.

Rozważmy zatem, na czym polega podobieństwo między organizmem żywym a zegarem? Otóż polega ono po prostu i wyłącznie na tym, że również ten pierwszy zbudowany jest z ciał stałych – aperiodycznych kryształów składających się na

substancję dziedziczną, wyjętą spod wpływów bezładnego ruchu cieplnego. Proszę wszakże nie posądzać mnie o traktowanie włókien chromosomowych jako „trybów maszyny organicznej", a przynajmniej bez odwoływania się do fundamentalnych teorii fizycznych leżących u podłoża tego podobieństwa.

Aby uzasadnić bezprecedensowy charakter układu, jakim jest organizm żywy, trzeba bowiem wskazać również to, czym różni się on od zegara.

Najbardziej uderzające cechy to, po pierwsze, rozproszenie owych trybów w organizmach wielokomórkowych, o czym mówiłem wyżej (str. 96) w stylu nieco poetyckim, a po drugie fakt, że tryby te nie są wytworem człowieka, lecz arcydziełem powstałym zgodnie z regułami boskiej mechaniki kwantów.

Epilog

O determinizmie i wolnej woli

Jako zadośćuczynienie za ciężki wysiłek, włożony w przedstawienie *sine ira et studio* czysto naukowych aspektów naszego problemu, pozwólcie Państwo, że na zakończenie omówię swój subiektywny pogląd na temat wniosków filozoficznych z niego płynących.

Zgodnie z przedstawionymi wyżej świadectwami, wydarzenia czasoprzestrzenne zachodzące w organizmie żywej istoty, powiązane z funkcjonowaniem jej umysłu, jej samoświadomością oraz innymi czynnościami, są (również ze względu na ich złożoną strukturę i przyjęte wyjaśnienia statystyczne ich fizyko-chemii) jeśli nie ściśle deterministyczne, to statystyczno-deterministyczne. Zwracając się do fizyków, chciałbym podkreślić, że moim zdaniem, a wbrew utrzymywanym gdzieniegdzie poglądom, kwantowe niezdeterminowanie nie odgrywa istotnej roli biologicznej; z wyjątkiem, być może, wzmacniania przypadkowego charakteru takich zjawisk, jak mejoza oraz mutacje powodowane przez naturalne lub sztuczne promieniowanie, co *nota bene* jest oczywiste i powszechnie uznawane.

Proszę pozwolić mi potraktować to jako dobrze ustalony fakt. I nie sprzeciwiałby mu się chyba żaden nieuprzedzony biolog, gdyby nie niemiłe uczucie, że oznacza to „traktowanie siebie samego jako maszyny". Sądzimy bowiem zwykle, że stanowisko takie przeczy wolnej woli, poświadczanej przez introspekcję.

Jednakże bezpośrednie doświadczenia, jakkolwiek nie byłyby one rozmaite i niewspółmierne ze sobą, nie mogą logicznie przeczyć sobie. Zastanówmy się zatem, czy potrafimy wy-

ciągnąć słuszne i niesprzeczne ze sobą wnioski z poniższych dwóch przesłanek:

1. Ciało moje funkcjonuje w sposób czysto mechaniczny zgodnie z prawami natury.
2. A jednak na podstawie niezaprzeczalnego bezpośredniego doświadczenia wiem, że kieruję jego ruchami, przewidując ich doniosłe skutki, i wobec tego czuję się za nie odpowiedzialny.

Jedyny możliwy wniosek płynący z tych przesłanek polega, jak sądzę, na uznaniu, że „Ja" (w najszerszym rozumieniu tego słowa, to jest oznaczającym każdy świadomy umysł, który kiedykolwiek powiedział lub pomyślał o sobie „Ja") jestem tą osobą, która kontroluje zgodnie z prawami natury ruch atomów.

W kręgu kulturowym (*Kulturkreis*), gdzie pewne koncepcje uległy ograniczeniu i specjalizacji, warto pokusić się o sformułowanie tego wniosku w tak prostych słowach, jak to tylko możliwe. Na gruncie chrześcijaństwa powiedzenie „Ja zatem jestem Bogiem Wszechmogącym" brzmi jak bluźnierstwo obłąkanego. Pomińmy jednak na chwilę taką konotację i rozważmy, czy nie jest to najdalszy wniosek, do jakiego dojść może biolog, aby dowieść zarazem istnienia Boga i nieśmiertelności.

Samo przez się podejście to nie jest nowe. O ile wiem, liczy sobie co najmniej 2500 lat. Uznanie w staroindyjskich Upaniszadach tożsamości Atmana z Brahmanem (indywidualnej jaźni z wszechobecną i wszechobejmującą jaźnią wieczną) bynajmniej nie uchodziło za bluźnierstwo, lecz – przeciwnie – za kwintesencję najgłębszego wejrzenia w wydarzenia świata. Dążeniem wszystkich badaczy Wedanty było przyswojenie sobie tej najważniejszej myśli.

Również mistycy, niezależnie od siebie, lecz w pełnej zgodzie (niemal jak cząstki gazu idealnego) opisywali to niepowtarzalne doświadczenie swego życia, które streścić się da w zdaniu *Deus factus sum* (stałem się Bogiem).

Myśl ta pozostała obca zachodniej ideologii wbrew Schopenhauerowi oraz innym, którzy jej bronili, i wbrew prawdziwym kochankom, którzy patrząc sobie nawzajem w oczy, sta-

ją się świadomi, że ich myśl i radość są numerycznie tożsame – są identyczne, a nie zaledwie podobne. Z reguły bywają oni jednak zbyt emocjonalnie zaangażowani, aby się jasno wyrażać, i pod tym względem przypominają mistyków.

Pozwolę sobie na kilka dalszych uwag. Świadomość nigdy nie jest doświadczana w liczbie mnogiej, a zawsze – w pojedynczej. Nawet w patologicznych przypadkach rozdwojenia osobowości obie tożsamości nigdy nie pojawiają się jednocześnie. W naszych snach wcielamy się w wiele postaci, ale są one zawsze odróżnialne. Mówimy i działamy jako jedna osoba, a jednocześnie oczekujemy odpowiedzi czy reakcji drugiej, nieświadomi faktu, iż sami kontrolujemy czyny i słowa obu, dokładnie tak jak własne.

Skąd zatem w ogóle bierze się idea mnogości, z taką emfazą odrzucana w Upaniszadach? Świadomość związana jest z fizycznym stanem ograniczonego układu materialnego, to znaczy ciała, i jest też zależna od niego. (Pomyślmy o zmianach stanu umysłu w toku rozwoju organizmu, w trakcie dojrzewania, starzenia się, dziecinnienia albo w gorączce, pod wpływem narkotyków, w narkozie, w przypadku uszkodzenia mózgu itd.). Istnieje jednak mnogość podobnych do siebie organizmów, toteż hipoteza „wielości świadomości" czy też „wielości umysłów" wydaje się sugestywna. Uznają ją zapewne zarówno wszyscy prości ludzie, jak i liczni zachodni filozofowie.

Hipoteza ta wiedzie niemal natychmiast do idei istnienia dusz, równie licznych co organizmów, i do pytania, czy są one śmiertelne jak organizmy, czy też nieśmiertelne i zdolne do samodzielnego bytowania. Pierwsza ewentualność jest przykra (śmiertelność), druga natomiast pomija, ignoruje lub wprost odrzuca fakty, na których wspiera się hipoteza mnogości. Zadawano nieraz jeszcze głupsze pytania: czy zwierzęta mają dusze, a nawet – czy mają ją kobiety, a nie tylko mężczyźni?

Takie konsekwencje, choćby tylko hipotetyczne, skłaniają do sceptycyzmu wobec hipotezy mnogości, wspólnej wszystkim zachodnim oficjalnym wiarom. Czy jednak nie skłaniamy

się do jeszcze większego nonsensu, kiedy odrzucamy przesąd, a zachowujemy naiwne przekonanie o wielości dusz i „ratujemy się" powiadając, iż są one śmiertelne i giną wraz z ciałem?

Jedyne możliwe rozwiązanie polega na odwołaniu się do bezpośredniego doświadczenia, mówiącego, że świadomość jest jedna, a w liczbie mnogiej nie istnieje, i że to, co uchodzi za mnogość, to tylko spowodowane złudzeniem różne aspekty owej jednej rzeczy (hinduska Maja). Analogiczne złudzenie przeżywamy w galerii luster; podobnie Gaurisankar i Mount Everest okazały się tym samym szczytem, widzianym z różnych dolin.

Istnieją oczywiście pomysłowe opowieści o duchach, utrudniające nam przyjęcie tego prostego wniosku. Tak na przykład mówiono, że kiedy za moim oknem rośnie drzewo, to tym, co ja naprawdę widzę, nie jest ono, gdyż w jakiś nie do końca zbadany, przebiegły sposób odciska ono tylko w mojej świadomości swój obraz i ten właśnie obraz postrzegam. Jeśli kto inny stanie obok mnie i spojrzy na to samo drzewo, odciśnie ono swój obraz również w jego duszy. Ja widzę moje drzewo, on zaś – swoje, zadziwiająco podobne do mojego. Ale czym jest drzewo „samo w sobie" – tego nie wiemy. Za to dziwactwo odpowiedzialny jest Kant. W ramach koncepcji traktującej świadomość jako *singulare tantum* dziwactwo to zostaje zastąpione twierdzeniem, że istnieje tylko jedno drzewo za oknem, a gadanina o obrazach to opowieści o duchach.

Jednakże każdy z nas ma prawo do prywatnego przekonania, że wszystkie jego doświadczenia i wspomnienia składają się w jedną całość, różniącą go od dowolnej innej osoby, i o całości tej mówi „Ja". Czym jest owo „Ja"?

Jeśli je dokładniej zbadamy, stwierdzimy, jak sądzę, że składa się na nie niewiele więcej niż pojedyncze dane (doświadczenia i wspomnienia), a mianowicie jakaś osnowa, na której się one odkładają. Na podstawie wnikliwej introspekcji przekonujemy się, że tym, co rzeczywiście uważamy za nasze „Ja", jest właśnie owa osnowa. Możemy wyjechać do dalekiego kraju, zerwać ze wszystkimi przyjaciółmi, zapomnieć o nich, znaleźć nowych i dzielić z nimi życie jak z byłymi. Co-

raz mniej istotnym stawać się będzie fakt, że wiodąc nowe życie, wspominasz wciąż poprzedni okres. O „młodzieńcu, jakim byłeś" zaczynasz mówić w trzeciej osobie, staje się on coraz dalszy twemu nowemu wcieleniu, z pewnością bardziej żywemu i lepiej ci znanemu. A jednak nie nastąpiło żadne zerwanie, „tamten" nie umarł. I nawet gdyby biegły hipnotyzer wymazał z twej pamięci wszystkie dawne wspomnienia, nie uznasz przecież, że zabił ciebie. Poprzednia egzystencja nie została unicestwiona do tego stopnia, by trzeba ją było opłakiwać. I nie nastąpi to nigdy.

Uwaga do epilogu

Przedstawiony tu pogląd wymierzony jest przeciwko temu, co Aldous Huxley określił ostatnio - i bardzo słusznie - jako wieczną filozofię. Jego piękna książka (*The Perennial Philosophy*. Chatto i Windus, Londyn 1946) nie tylko wyśmienicie tłumaczy ten stan rzeczy, lecz również wyjaśnia, dlaczego tak trudno sobie z nim poradzić i nie narazić się na sprzeciw.

UMYSŁ I MATERIA

Wykłady im. Tarnera wygłoszone w Trinity College, Cambridge w październiku 1956 roku

Mojemu sławnemu i ukochanemu
przyjacielowi HANSONOWI HOFFOWI,
z głębokim uznaniem

1

Fizyczne podstawy świadomości

Problem

Świat jest konstrukcją naszych wrażeń, percepcji i wspomnień. Dla wygody przyjmujemy, że istnieje obiektywnie, samoistnie. Z pewnością jednak nie jawi się na mocy samego swego istnienia. Jest dla nas owocem także bardzo szczególnych przebiegów zdarzeń w tej wyróżnionej części świata, jaką jest nasz mózg. To nader osobliwe twierdzenie każe zapytać: jakież to szczególne cechy wyróżniają przebiegające w mózgu procesy, umożliwiające odwzorowywanie się w nim świata? Czy potrafimy odgadnąć, które z nich są, a które nie są do tego usposobione? Lub prościej: jakiego to rodzaju procesy materialne związane są bezpośrednio ze świadomością?

Racjonalista skłonny będzie załatwić się żwawo z tym problemem, powiadając z grubsza co następuje: na podstawie naszego własnego doświadczenia oraz analogii w świecie zwierząt wyższych sądzimy, iż świadomość związana jest z pewnym rodzajem zdarzeń zachodzących w materii żywej, a mianowicie z niektórymi procesami nerwowymi. Kwestia, jak daleko sięgając w głąb królestwa zwierząt, napotykamy jakiś rodzaj świadomości i na czym polegać może świadomość w tych wczesnych stadiach ewolucji, jest problemem nierozstrzygalnym, przedmiotem daremnych spekulacji. Lepiej go pozostawić nawiedzonym fantastom. Jeszcze bardziej bezowocne jest wdawanie się w rozważania, czy przypadkiem również i inne procesy, w tym nieorganiczne, nie są jakoś związane ze świadomością. Wszystko to są fantastyczne pomysły, równie trudne do udowodnienia, jak do obalenia, a więc naukowo bezwartościowe.

Temu, kto zgadza się na pominięcie takich pytań, należy jednak uświadomić, jak ogromną lukę dopuszcza tym samym w swym obrazie świata. Albowiem pojawienie się komórek nerwowych i mózgu w niektórych grupach organizmów było bardzo szczególnym zdarzeniem, z którego sensu i znaczenia zdajemy sobie dobrze sprawę. Chodzi o najbardziej przemyślny rodzaj mechanizmu, dzięki któremu osobnik reaguje na zmienne okoliczności, dostosowując do nich swe zachowanie, i gdziekolwiek mechanizm ten się pojawia, zaczyna odgrywać rolę dominującą. Nie jest on jednak *sui generis*; liczne grupy organizmów, w szczególności rośliny, uzyskują podobne wyniki w zgoła odmienny sposób.

Czy skłonni jesteśmy sądzić, że ten szczególny zwrot w rozwoju zwierząt wyższych, zwrot, który bynajmniej nie musiał się dokonać, stał się warunkiem niezbędnym po temu, by świat jawił się samemu sobie w błyskach świadomości? Czy w przeciwnym razie nie byłby on sztuką odgrywaną przed pustą widownią, nie postrzeganą przez nikogo, a więc ściśle mówiąc – nie istniejącą? Byłoby to bankructwo wizji świata. Konieczności poszukiwania wyjścia z tego ślepego zaułka nie powinna tamować obawa przed przemądrzałymi drwinami racjonalistów.

Zdaniem Spinozy każda poszczególna rzecz, czy też każdy byt, jest sposobem przejawiania się jedynej nieskończonej substancji – Boga. Istniejące rzeczy ujawniają każdy jego atrybut, w szczególności rozciągłość i myślenie. Pierwszy polega na cielesnym istnieniu w czasie i w przestrzeni – drugi, w przypadku człowieka lub zwierzęcia, na psychiczności. Wedle Spinozy każda nieożywiona rzecz cielesna jest równocześnie „myślą Boga", co oznacza, że każda stanowi zarazem *modus* atrybutu myślenia. Nie po raz pierwszy, nawet w historii filozofii zachodniej, mamy tu do czynienia z koncepcją panpsychizmu. Filozofów jońskich, którzy dwa tysiące lat wcześniej głosili tę koncepcję, nazwano hylozoistami. Już po Spinozie genialny Gustav Theodor Fechner nie wzdragał się przypisywać duszy także roślinom i Ziemi jako ciału niebieskiemu, a także Układowi Słonecznemu itd. Nie zamierzam kontynuować tamtych

fantazji; nie mnie jednak orzekać komu bliżej do prawdy – Fechnerowi czy współczesnym bankrutom racjonalizmu.

Wstępna odpowiedź

Jak widać, każda próba poszerzenia obszaru świadomości poprzez dopuszczenie, że świadomość może być związana z jakimiś innymi procesami niż nerwowe, prowadzi z konieczności do niesprawdzalnych spekulacji. Staniemy jednak na twardszym gruncie, jeśli pójdziemy w kierunku odwrotnym. Nie każdemu procesowi nerwowemu, a nawet nie każdemu procesowi mózgowemu towarzyszy świadomość. Często nie jest tak nawet, jeśli pod względem fizjologicznym i biologicznym przypominają one bardzo procesy „świadome", zarówno pod tym względem, że polegają na następstwie bodźców aferentnych i eferentnych (dośrodkowych i odśrodkowych) oraz regulują biologicznie ważne reakcje organizmu, zarówno wewnętrzne, jak skierowane na zewnątrz. Mamy z nimi na przykład do czynienia w przypadku wielu czynności odruchowych w zwojach nerwowych rdzenia kręgowego i w tej części układu nerwowego, które one kontrolują. Istnieje jednak (i nimi się właśnie zajmiemy) wiele procesów odruchowych, w których wprawdzie mózg uczestniczy, ale które nie są wcale, albo prawie wcale, uświadamiane. Odróżnienie to nie jest ostre – pomiędzy pełnym uświadamianiem i nieuświadamianiem pojawiają się stany pośrednie. Badając rozmaite, bardzo podobne do siebie pod względem fizjologicznym procesy przebiegające w naszym własnym organizmie, bez trudu na podstawie obserwacji i rozumowania stwierdzimy, o jakie to cechy wyróżniające może chodzić.

Kluczem do rozstrzygnięcia mogą być, moim zdaniem, następujące dobrze znane fakty. Wszelkie ciągi zdarzeń, w których uczestniczą nasze wrażenia, postrzeżenia i – ewentualnie – czynności, wypadają z pola świadomości wówczas, gdy często się powtarzają w ten sam sposób. Stają się jednak na nowo przedmiotem świadomości w przypadku, gdy okoliczności, w jakich przebiegają, różnią się od dotychczasowych. Nawet

jednak wówczas w obszar świadomości trafiają tylko te modyfikacje, czy też „odmienności", które wyróżniają nowy przypadek od poprzednich, wymagając zatem „ponownego rozważenia". Na podstawie osobistego doświadczenia każdy wskazać potrafi dziesiątki tego rodzaju przykładów, toteż nie ma potrzeby, bym teraz jakieś przytaczał.

Stopniowe wypadanie z pola świadomości jest zjawiskiem o podstawowym znaczeniu dla całej struktury naszego życia umysłowego, którego jedyną podstawą jest zdobywanie, opartego na kumulacji, doświadczenia dzięki powtarzaniu; dla tego procesu, do którego jeszcze wrócimy, Richard Semon ukuł nazwę ogólną *mneme*. Doświadczenie, które się nigdy nie powtórzy, jest biologicznie bez znaczenia. Wartościowe staje się dopiero wówczas, gdy prowadzi do wyuczenia się reakcji na sytuację powtarzającą się wielokrotnie i wymagającą takiej samej za każdym razem odpowiedzi organizmu, jeśli ma on sobie z nią radzić. Otóż na podstawie wewnętrznego doświadczenia osobistego wiemy co następuje: po kilku pierwszych powtórzeniach w umyśle pojawia się nowy element oznaczający „coś już spotkanego", coś „zanotowanego", jak mówił Richard Avenarius. Przy częstym powtarzaniu cały ciąg zdarzeń staje się coraz bardziej rutynowy, coraz mniej interesujący, a reakcje – im mniej uświadamiane, tym bardziej niezawodne. Dziecko recytuje wiersz lub gra sonatę na pianinie „nieomal jak we śnie". Idziemy do pracy zwykłą drogą, przechodzimy ulicę tam, gdzie zawsze, skręcamy w przecznicę, a myśl nasza zajęta jest zgoła czym innym. Ilekroć jednak sytuacja jakoś istotnie się różni, dajmy na to droga jest zagrodzona i musimy wybrać okrężną, napotkana zmiana i nasza na nią reakcja zostaje uświadomiona; o ile sytuacja ta powtarza się, radzimy sobie z nią znów rutynowo. W obliczu różnych ewentualności utrwalają się warianty reakcji. W określonym momencie, nie myśląc o tym, wybieram właściwą drogę do audytorium lub laboratorium fizycznego, skoro i tu, i tam często dotąd chodziłem.

Różnice sytuacji i reakcje na nie oraz ich warianty gromadzą się w nieprzeliczalnej ilości, ale w polu świadomości pozostają tylko ostatnio nabyte, te, których organizm żywy jeszcze

się nie wyuczył. Można by metaforycznie powiedzieć, że świadomość jest nauczycielem nadzorującym kształcenie się substancji żywej, ale pozwala uczniowi na samodzielne dawanie sobie rady z zadaniami, których wykonanie wytrenował już w dostatecznym stopniu. Z całą siłą muszę jednak podkreślić, że jest to tylko metafora. Rzecz cała sprowadza się zaś do tego, że w polu świadomości utrzymują się tylko nowe sytuacje i reakcje na nie, nie zaś stare, dobrze wytrenowane.

Starannego, dokładnego wyuczenia wymagają setki rozmaitych codziennych czynności. Przykładem mogą być podejmowane przez dziecko pierwsze próby chodzenia; pozostają one niewątpliwie w polu jego świadomości, a własny sukces wywołuje radosne okrzyki. Kiedy dorosły wiąże sznurowadła, zapala światło, rozbiera się wieczorem, używa noża i widelca, żadna z tych wyuczonych już czynności nie wytrąca go z toku rozmyślań, które aktualnie snuje. Czasem rezultatem są zabawne pomyłki. Podobno pewien słynny matematyk położył się do łóżka i zgasił światło w chwili, gdy w jego domu gromadzili się goście. Otóż przed przyjęciem udał się do sypialni, by zmienić koszulę; gdy zamyślony zdjął nieświeżą, uruchomił ciąg czynności, jakie rutynowo zwykł wykonywać, kładąc się spać.

Cały ten stan rzeczy, równie dobrze znany z ontogenezy naszego życia umysłowego, jak bicie serca lub perystaltyka jelit, rzuca światło na filogenezę nieświadomych procesów nerwowych. Stale czy też regularnie powtarzające się reakcje zostały dobrze ugruntowane i wytrenowane, i dlatego wypadają z pola świadomości. Również i tu miewamy do czynienia ze stanami pośrednimi; tak na przykład oddychanie, które zazwyczaj przebiega niezauważalnie, skupia na sobie uwagę i jest świadomie modyfikowane w niecodziennych sytuacjach – powiedzmy, w zadymionym powietrzu albo podczas ataku astmy. Innym przykładem może być atak płaczu ze smutku, radości lub bólu, który – choć uświadamiany – nie zależy od naszej woli. I tu zdarzają się zabawne pomyłki, jak jeżenie się włosów ze strachu czy wstrzymanie wydzielania śliny w stanie wielkiego podniecenia; reakcje te musiały kiedyś mieć jakiś sens biologiczny, lecz utraciły go u człowieka.

Nie jestem pewien, czy wszyscy zgodzą się na kolejny krok, polegający na takim uogólnieniu owych pojęć, by stosowały się do procesów innych niż nerwowe. Póki co, krótko tylko o nim wspomnę, choć osobiście wydaje mi się krokiem najważniejszym. Uogólnienie to rzuca bowiem światło na nasz wyjściowy problem, a mianowicie – jakie to materialne procesy związane są ze świadomością lub jej towarzyszą? A oto możliwa odpowiedź na to pytanie. Wskazana wyżej właściwość procesów nerwowych przysługuje procesom organicznym w ogóle; związane są mianowicie ze świadomością w tej mierze, w jakiej są nowe.

Zgodnie z koncepcją i terminologią Richarda Semona, ontogeneza nie tylko mózgu, lecz całej indywidualnej somy, to „dobrze zapamiętane" powtórzenie ciągu zdarzeń, które tysiąckrotnie zachodziły uprzednio mniej więcej w ten sam sposób. Jej wstępne stadia, jak wiemy z własnego doświadczenia, mające początek w łonie matki, pozostają nieuświadomione. Również pierwsze tygodnie życia po urodzeniu spędzamy głównie we śnie. W tym czasie noworodek przechodzi ewolucję, w toku której ma do czynienia z niezmiennymi w zasadzie warunkami. Dalszemu jego rozwojowi organicznemu towarzyszyć zaczyna świadomość, lecz w tej tylko mierze, w jakiej współdziała ona z narządami przystosowującymi swoje funkcje do zmian sytuacji, ulegającymi zewnętrznym oddziaływaniom, ćwiczonymi i w szczególny sposób modyfikowanymi przez otoczenie. Jako wyższe kręgowce dysponujemy takim narządem – jest nim przede wszystkim układ nerwowy. Nasza świadomość związana jest z tymi jego funkcjami, które na podstawie tego, co nazywa się doświadczeniem, przystosowują się do stale zmieniającego się otoczenia. Układ nerwowy jest systemem, w którym wciąż jeszcze dokonują się filogenetyczne przekształcenia naszego gatunku. Mówiąc metaforycznie, chodzi tu o *Vegetationsspitze* (szczyt wegetacyjny). Podsumowując swoją ogólną hipotezę, powiedziałbym: świadomość związana jest z uczeniem się substancji żywej; jej *know-how* (*Können*) jest nieuświadomione.

Etyka

Nawet bez tego ostatniego uogólnienia, tak ważnego dla mnie, lecz mogącego budzić wątpliwości u innych, zarysowana teoria świadomości zdaje się torować drogę naukowemu wyjaśnieniu etyki.

U wszystkich ludów i we wszystkich epokach podstawą każdego poważnie traktowanego kodeksu etycznego (*Tugendlehre*) było i jest samoprzezwyciężanie się (*Selbstüberwindung*). Nauczanie etyki przybiera zawsze formę zaleceń, wezwań, przykazań („nie będziesz..."), przeciwstawiających się naszej pierwotnej woli. Skąd bierze się ten szczególny kontrast między moim „chcę" a „nie będziesz"? Czy nie jest absurdem oczekiwanie, że stłumię swoje naturalne skłonności, zaprzeczę sam sobie, będę inny niż rzeczywiście jestem? Dziś, częściej niż kiedykolwiek w przeszłości, oczekiwania takie spotykają się z drwiną. „Jestem, jaki jestem, nie ograniczajcie mojej osobowości! Pozwólcie na swobodną ekspresję skłonności, w jakie wyposażyła mnie natura. Wszelkie sprzeczne z nimi powinności to nonsens, szalbierstwo kapłanów. Bóg to przyroda i należy uznać, że ukształtowała mnie takim, jakim chce, abym był". Hasła takie rozlegają się z różnych stron. Niełatwo jest przeciwstawić się ich brutalnej oczywistości. Kantowski imperatyw jest jawnie irracjonalny.

Na szczęście jednak naukowe podstawy tego rodzaju haseł są całkiem zbutwiałe. Dostępna wiedza o stawaniu się (*das Werden*) organizmów pozwala z łatwością zrozumieć, że świadome życie nie tylko powinno, lecz faktycznie jest nieuchronną i nieustającą walką z naszym pierwotnym *ego*. Nasza jaźń bowiem, wraz z jej wrodzonymi skłonnościami, jest psychicznym odpowiednikiem materialnego dziedzictwa po przodkach. Jako gatunek rozwijamy się, kroczymy w awangardzie pokoleń; toteż każdy dzień życia człowieka jest maleńkim kroczkiem trwającej wciąż ewolucji gatunku. Jeden dzień życia, a nawet całe życie jednostki to, oczywiście, zaledwie tyle, co drobny rys dłutem na rzeźbionym posągu. Ale na całą ogromną ewolucję, jaką przeszliśmy w przeszłości, złożyły się

właśnie miliardy takich drobnych rysów. Materialnym podłożem tej transformacji są spontaniczne mutacje dziedziczone z pokolenia na pokolenie. Niemniej na ich selekcję w decydujący sposób wpływa zachowanie nosiciela mutacji, jego sposób życia. W przeciwnym razie nie można by zrozumieć ani pochodzenia gatunku, ani wyraźnie ukierunkowanego doboru naturalnego nawet w długim, lecz ograniczonym przecież i dobrze znanym czasie.

Na każdym etapie życia codziennego coś w naszej dotychczasowej naturze ulega zmianie, zostaje zatarte, zastąpione czymś nowym. Opór, jaki tym zmianom stawia nasza wola, jest odpowiednikiem oporu, jaki dłutu rzeźbiarza stawia bryła kamienia. W tym wszakże przypadku każdy z nas jest zarazem i bryłą, i dłutem, zwycięzcą i pokonanym – jest to bowiem ciągły proces samoprzezwyciężania się (*Selbstüberwindung*).

Czy jednak, zważywszy tempo procesu ewolucji, niezwykle powolne nie tylko w porównaniu z czasem życia jednostki, lecz również z czasem historycznym, nie jest absurdem sugestia, że proces ten powinien stać się znaczącym i bezpośrednim przedmiotem świadomości? Czy w rzeczywistości nie przebiega właśnie poza nią?

Bynajmniej. Nasze dotychczasowe rozważania przeczą tej supozycji. Zgodnie z nimi bowiem, świadomości towarzyszą fizjologiczne procesy ulegające przekształceniom pod wpływem oddziaływań ze zmieniającym się środowiskiem. Co więcej, doszliśmy do wniosku, że uświadamiane zostają tylko te modyfikacje, które nie są jeszcze przyswojone, które dopiero później zostają dziedzicznie utrwalone i przechodzą do nieuświadamianego wyposażenia gatunku. Krótko mówiąc, świadomość jest zjawiskiem ewolucyjnym. Świat jawi się samemu sobie tylko wówczas i w tej mierze, w jakiej rozwija się, rodzi nowe formy. Stany stagnacji wymykają się świadomości. Jawią się tylko wówczas, gdy wchodzą w obszar ewolucji.

Skoro tak, to świadomość i niezgoda z samym sobą są nierozerwalnie związane, choć muszą w jakiejś mierze nawzajem się równoważyć. Brzmi to jak paradoks, ale znają go starożytne ludy i najmądrzejsi ludzie. Mężczyźni i kobiety, którym

świat rozbłysnął w niezwykle jasnym świetle świadomości oraz którzy słowem i czynem bardziej niż inni kształtowali i przekształcali owo dzieło sztuki, jakie nazywamy ludzkością, mocniej niż ktokolwiek poświadczają swym życiem, iż targała nimi wewnętrzna niezgoda. Niech będzie to pocieszeniem dla tych, którzy również dzisiaj jej doświadczają. Bez niej wszakże nie zrodziło się nigdy nic trwałego.

Nie chciałbym być źle zrozumiany. Jestem uczonym, a nie moralistą. Nie należy sądzić, że bronię tu koncepcji dążenia gatunku do wyższych celów, jako podstawy do propagowania kodeksu moralnego. Tak być nie może, ponieważ jest to cel bezinteresowny, a zatem jego akceptacja zakłada już prawość. Podobnie jak inni, nie potrafię wyjaśnić powinności w duchu kantowskiego imperatywu. Prawo moralne w jego najprostszej najogólniejszej postaci („bądź bezinteresowny!") jest oczywistym faktem, akceptowanym przez znakomitą większość ludzi, nawet tych, którzy rzadko kiedy się do niego stosują. Traktuję je jako zadziwiające świadectwo tego, że skutkiem ewolucji biologicznej gatunku było przejście od postawy egoistycznej do altruistycznej, w wyniku czego człowiek stał się zwierzęciem społecznym. Dla zwierzęcia samotnego egoizm jest cnotą sprzyjającą zachowaniu i udoskonaleniu gatunku; w przypadku każdej społeczności staje się destrukcyjnym grzechem. Zwierzętom tworzącym społeczności groziłaby zguba, gdyby istotnie nie ograniczały egoizmu. O wiele starsze pod względem filogenetycznym gatunki społeczne – pszczoły, mrówki, termity – zarzuciły go całkowicie. Wciąż wszakże praktykują wyższe jego stadium – egoizm narodowy, czyli nacjonalizm: pszczoła-robotnica, która zabłądzi do obcego ula, zostaje natychmiast zamordowana.

W przypadku gatunku ludzkiego dokonuje się coś niezwykłego. Zanim jeszcze wyzbyliśmy się egoizmu indywidualnego, zaczynamy odrzucać egoizm zbiorowy. Choć wciąż jesteśmy zawziętymi egoistami, wielu z nas zaczyna traktować również nacjonalizm jako postawę godną potępienia. W rezultacie dojść może do czegoś niezwykłego. Dokonanie tego drugiego kroku – zaprzestanie wojen między narodami – może okazać

się łatwiejsze właśnie dlatego, że nie udało nam się jeszcze uwolnić od egoizmu, który wciąż zyskuje solidny odzew. Każdy z nas żyje dziś w strachu przed nowymi straszliwymi rodzajami broni, a tym samym zaczynamy tęsknić za pokojem między narodami. Gdybyśmy byli pszczołami, mrówkami lub spartańskimi wojownikami, którzy nie wiedzą, co to strach i dla których tchórzostwo jest największą hańbą, wojny musiałyby trwać wiecznie. Na szczęście jesteśmy tylko ludźmi, a więc tchórzami.

Do powyższych wniosków doszedłem dawno, jakieś trzydzieści lat temu. Nigdy się ich nie wyrzekłem, choć poważnie obawiałem się, że mogą zostać odrzucone, ponieważ zdają się zakładać „dziedziczenie cech nabytych", czyli lamarkizm, którego bynajmniej nie jestem skłonny akceptować. Wszakże mimo odrzucenia koncepcji dziedziczenia się cech nabytych i przyjęcia Darwinowskiej teorii ewolucji, sądzę, że zachowanie się jednostek ma znaczący wpływ na ewolucję gatunku, co stwarza pozory ulegania jakiejś odmianie wstydliwego lamarkizmu. Powołując się na autorytet Juliana Huxleya, wyjaśnię to w następnym rozdziale, pomyślanym jednak nie jako uzasadnienie wyłożonych tu koncepcji, lecz przedstawienie nieco innego zagadnienia.

2

Przyszłość poznania

Ślepa uliczka biologii?

Jest niezwykle mało prawdopodobne, by nasze rozumienie świata osiągnęło już nieprzekraczalne, optymalne pod jakimkolwiek względem stadium.[1] Mówiąc to, mam na myśli nie tylko przyszłe badania naukowe w różnych dziedzinach nauki, dociekania filozoficzne czy też poszukiwania religijne mogące udoskonalić naszą dzisiejszą wizję świata. To, co moglibyśmy osiągnąć w ten sposób w ciągu, dajmy na to, kolejnych dwóch i pół tysiąca lat – czyli w takim okresie, jaki minął od czasów Protagorasa, Demokryta i Antystenesa – byłoby z interesującego mnie tu punktu widzenia zgoła bez znaczenia. Nie ma żadnego powodu, by sądzić, że mózg nasz jest najlepszym z możliwych narządów myślenia, w którym odzwierciedla się świat. Nie da się wykluczyć przypuszczenia, że gatunek ludzki mógłby wykształcić narząd, który pod względem wyobraźni o tyle przewyższałby naszą własną, co z kolei nasza przewyższa wyobraźnię psa, a ta – na przykład ślimaka.

Skoro tak, to interesowałoby nas, jeśli nie ze względów zasadniczych, to choćby osobistych, czy cokolwiek w tym rodzaju może zostać osiągnięte na kuli ziemskiej przez naszych potomków. To nie warunki na Ziemi stoją temu na przeszkodzie. Ona jest od niedawna naszą posiadłością i życie na niej trwać może jeszcze co najmniej tyle, ile trzeba było dotąd (jakiś mi-

[1] Na rozdział ten składają się teksty trzech pogadanek radiowych nadanych we wrześniu 1950 roku przez European Service B.B.C., a następnie włączonych do wydania *What is Life? and other essays* (Anchor Book A88, Doubleday and Co., Nowy Jork).

liard lat), byśmy stali się tym, czym jesteśmy. Pytanie, czy my sami nie jesteśmy po temu przeszkodą? Jeśli sądzić po współczesnej teorii ewolucji – a lepszej nie mamy – wydawać się może, że tor dalszej ewolucji naszego gatunku został niemal zablokowany. Czy możemy się spodziewać dalszego rozwoju, to znaczy takich zmian cech fizycznych, czyli – mówiąc językiem biologów – genotypowych, które, tak jak obecne, zostałyby dziedzicznie utrwalone? Na pytanie to trudno odpowiedzieć. Być może docieramy do końca ślepej uliczki, a może nawet już tam dotarliśmy. Nie byłoby to zdarzenie wyjątkowe i nie znaczyłoby, że gatunek nasz musi wkrótce wymrzeć. Jak wiemy na podstawie świadectw geologicznych, niektóre gatunki bardzo dawno osiągnęły kres swych możliwości ewolucyjnych, a bynajmniej nie wymarły i od milionów lat nie ulegają zmianom, a w każdym razie nie bardzo istotnym. Dotyczy to na przykład żółwi i krokodyli będących reliktami bardzo odległej przeszłości. Podobnie rzecz się ma z dużymi grupami owadów, a składa się na nie większa liczba gatunków niż na całą pozostałą faunę, która w tym samym czasie zmieniła się nie do poznania. Dalszą ewolucję owadów zahamowała zapewne przyjęta przez nie koncepcja (nie muszę chyba tłumaczyć, że jest to przenośnia) szkieletu zewnętrznego. Taki pancerz, choć chroni i stanowi podporę dla ciała, nie może rosnąć w czasie dojrzewania jak szkielet ssaków. W rezultacie bardzo utrudnione stają się zmiany przystosowawcze podczas rozwoju osobniczego.

Wiele argumentów kwestionuje możliwość dalszej ewolucji gatunku ludzkiego. Zgodnie z teorią Darwina, dobór naturalny selekcjonuje bardzo nieliczne i drobne, zachodzące spontanicznie „korzystne" zmiany dziedziczne, zwane dziś mutacjami. Dlatego też przypisuje ona tak duże znaczenie liczebności potomstwa, z którego zaledwie niewielka część ma szansę przeżycia. Ponieważ tylko w ten sposób drobne zmiany prawdopodobieństwa przeżycia mają rzeczywistą szansę realizacji. W przypadku cywilizowanego człowieka działanie całego tego mechanizmu zostało zablokowane, a w pewnym sensie nawet odwrócone. Mówiąc ogólnie, nie chcemy, aby nasze dzieci cierpiały i ginęły. Toteż stopniowo powoływaliśmy instytucje

społeczne i prawne, których zadaniem jest z jednej strony ochrona życia, potępienie systematycznego dzieciobójstwa, pomoc chorym i utrzymywanie przy życiu upośledzonych, z drugiej zaś – zastąpienie eliminacji źle przystosowanych przez dostosowywanie liczebności potomstwa do wysokości dostępnych środków utrzymania. Bezpośrednio służy temu kontrola urodzeń, oraz – w przypadku wielu kobiet – powstrzymywanie się od współżycia. Czasem, o czym nasze pokolenie wie aż nazbyt dobrze, do zachowania równowagi przyczyniają się okrutne wojny i wszystkie klęski, jakie one za sobą pociągają. Miliony dorosłych i dzieci obojga płci ginie od epidemii, z głodu i z powodu trudnych warunków życia. W odległej przeszłości wojny między małymi plemionami czy klanami miały rzekomo sprzyjać doborowi, wpływ taki w czasach historycznych jest jednak raczej wątpliwy, a w naszych – wykluczony. Tak jak postęp medycyny umożliwia niewybiórcze utrzymywanie przy życiu, tak wojny polegają na niewybiórczym zabijaniu. Choć obie te instytucje wartościujemy bardzo różnie, to musimy się zgodzić, że ani jedna, ani druga nie mają żadnej pozytywnej wartości selekcyjnej.

Pozornie ponury aspekt darwinizmu

Jak wskazywałyby te rozważania, jako gatunek doszliśmy do kresu biologicznej ewolucji i nie mamy wielkich szans na dalszy rozwój. Lecz nawet gdyby tak było, nie musi to nas niepokoić. Tak jak krokodyle i wiele owadów trwać możemy przez miliony lat bez żadnych dalszych zmian. Jednakże z filozoficznego punktu widzenia jest to sytuacja przygnębiająca i spróbuję wskazać argumenty dowodzące czegoś wręcz przeciwnego. W tym celu zajmę się pewnym aspektem teorii ewolucji, podobnie ujętym przez Juliana Huxleya w jego dobrze znanej książce[2], a nie dość, jego zdaniem, uwzględnianym przez współczesnych ewolucjonistów.

[2] *Evolution: A Modern Synthesis*. George Allen and Unwin, 1942.

Na podstawie popularnych wykładów teorii Darwina łatwo dojść do smutnego i przygnębiającego poglądu na temat rzekomo biernej roli organizmu w procesie ewolucji. Mutacje w genomie – „substancji dziedzicznej" – zachodzą spontanicznie. Mamy powody sądzić, że dochodzi do nich w wyniku procesów, które fizyk określa mianem fluktuacji termodynamicznych, czyli – innymi słowy – całkowicie przypadkowo. Osobnik nie ma najmniejszego wpływu ani na spadek dziedziczony po rodzicach, ani na to, co sam przekaże swemu potomstwu. O żywotności mutacji decyduje „dobór naturalny najlepiej dostosowanych", a więc znów czysty przypadek, który oznacza, że to korzystna mutacja zwiększa szansę przeżycia osobnika oraz wydania przez niego potomstwa. Cała reszta aktywności osobnika za życia wydaje się całkowicie pozbawiona biologicznego znaczenia, nie wpływa bowiem na potomstwo: cechy nabyte nie są dziedziczone. Każda uzyskana umiejętność przepada bez śladu, ginie wraz z jej nosicielem: żadna nie jest dziedziczna. W tej sytuacji istota inteligentna dojść musi do wniosku, że w pewnym sensie przyroda odmawia jej współpracy, czyni wszystko sama, skłania jednostkę do bezczynności, czyli w istocie – do nihilizmu.

Jak wiadomo, to nie Darwin stworzył pierwszą systematyczną teorię ewolucji. Wyprzedził go w tym Lamarck przekonany, że każda nowa cecha osobnicza uzyskana wskutek oddziaływania specyficznego środowiska lub zachowania w okresie poprzedzającym prokreację może być – i zazwyczaj jest, przynajmniej w jakimś stopniu – przekazywana potomstwu. Jeśli na przykład zwierzęta żyjące na terenach skalnych lub piaszczystych wykształciły na stopach ochronne zgrubienia skóry, to zgrubienia te staną się dziedziczne: następne pokolenia otrzymają je w spadku i nie będą już musiały trudzić się, by je uzyskać. Analogicznie siła, umiejętność, czy nawet znaczące przystosowanie dowolnego narządu, powstałe dzięki jego stałemu używaniu, nie zostaną utracone, lecz będą choćby częściowo przekazywane kolejnym pokoleniom. Pogląd ten stanowi nie tylko proste wytłumaczenie zadziwiających, wyszukanych przystosowań do środowisk tak charakte-

rystycznych dla istot żywych. Dodaje ponadto otuchy, zachęca do działania. Jest o wiele bardziej atrakcyjny od ponurego pasywizmu, do którego pozornie skłania darwinizm. Istota inteligentna, traktująca siebie jako ogniwo w długim łańcuchu pokoleń, może dzięki teorii Lamarcka żywić nadzieję, że jej wysiłki, mające na celu samodoskonalenie się, nie pójdą pod względem biologicznym na marne, lecz choćby nawet w niewielkim stopniu staną się integralnym składnikiem stałego dążenia organizmów do doskonałości.

Niestety, lamarkizmu obronić się nie da. Zasadnicza jego przesłanka, przekonanie, iż cechy nabyte są dziedziczne, jest na gruncie posiadanej przez nas dziś wiedzy nie do utrzymania. Poszczególne kroki ewolucyjne są rezultatem spontanicznych, przypadkowych mutacji i w ogóle nie zależą od zachowania jednostki za życia. Wydaje się zatem, że przedstawiony wyżej przygnębiający aspekt darwinizmu jest nie do uniknięcia.

Zachowanie wpływa na dobór

Chciałbym jednak pokazać, iż rzecz ma się nieco inaczej. Nie kwestionując w niczym podstawowych założeń darwinizmu, przekonać się można, że zachowanie jednostki, sposób, w jaki wykorzystuje ona swe wrodzone umiejętności, odgrywa istotną, a może nawet najistotniejszą rolę w ewolucji. Lamarkizm zawiera tę ważną prawdę, że między funkcjonowaniem (rzeczywistym sposobem wykorzystywania jakiejś konkretnej cechy czy narządu) a ich ewolucją w ciągu pokoleń, doskonaleniem się ich ze względu na cele, którym służą, zachodzi nierozerwalny związek przyczynowy. Moim zdaniem dostrzeżenie związku między wykorzystywaniem a udoskonalaniem jest ważnym osiągnięciem poznawczym lamarkizmu, a darwinizm bynajmniej go nie przekreśla, o ile tylko nie jest traktowany w sposób uproszczony. Zdarzenia przebiegają niemal dokładnie tak, jak to przedstawia lamarkizm, tyle że sprawy dzieją się na mocy bardziej skomplikowanego mechanizmu,

niż Lamarck sobie wyobrażał. Stanowisko takie nie jest łatwo uzasadnić, toteż celowe będzie przedstawienie z góry wniosku końcowego. Aby rzecz uściślić, mówmy o narządzie, choć cechą, o którą chodzi, mogłaby być dowolna właściwość, zachowanie, zwyczaj, a nawet każda ich niewielka modyfikacja. Wedle Lamarcka narząd (a) jest wykorzystywany i przez to (b) udoskonalany, a (c) zmiana jest dziedziczona przez potomstwo. W rzeczywistości dzieje się inaczej. Narząd (a) ulega przypadkowym modyfikacjom, (b) te, które okazują się przydatne, kumulują się wskutek doboru, co (c) trwać może przez pokolenia, a wyselekcjonowane mutacje stanowią trwałe udoskonalenie. Z uderzającą symulacją procesu lamarkowskiego mamy do czynienia wówczas – zdaniem Juliana Huxleya – gdy początkowe zmiany rozpoczynające cały proces nie są prawdziwymi mutacjami, a w każdym razie nie podlegają dziedziczeniu. Jeśli jednak okażą się korzystne, kumulują się dzięki, jak to Huxley nazywa, doborowi organicznemu i torują tym samym drogę prawdziwym mutacjom, które są natychmiast wybierane, jeśli tylko okaże się, że prowadzą we „właściwym kierunku".

Przedstawmy teraz ten proces bardziej szczegółowo. Najważniejsze to zdawać sobie sprawę, że nowa cecha bądź modyfikacja powstała wskutek zmiany lub mutacji, czy też w wyniku mutacji i jakiegoś wstępnego doboru, może łatwo skłonić organizm do takiego działania względem swojego środowiska, które wzmaga pożytek płynący z posiadania tej cechy, a tym samym sprzyja faworyzowaniu jej przez dobór. W wyniku uzyskania nowej lub modyfikacji posiadanej już cechy organizm może być skłonny do zmiany swojego środowiska, przekształcając je lub migrując w poszukiwaniu nowego; może też zmienić swoje zachowanie związane z pozostawaniem w określonym środowisku – a wszystko po to, by znacznie wzmocnić przydatność nowej cechy i tym samym przyśpieszyć jej selektywne doskonalenie w obranym kierunku.

Twierdzenie to może wydać się dziwne, ponieważ zdaje się zakładać celowe działanie organizmu, a nawet jego poważnie rozwiniętą inteligencję. Toteż pragnę podkreślić, że moja teza,

choć oczywiście dotyczy również rozumnych, celowych zachowań zwierząt wyższych, nie ogranicza się bynajmniej do nich. Oto kilka przykładów.

Nie wszystkie osobniki danej populacji żyją w dokładnie takim samym środowisku. Jedne dzikie kwiaty rosną w miejscach cienistych, podczas gdy inne, należące do tego samego gatunku – w nasłonecznionych; jedne – na wyższych partiach zbocza, inne w dolnych lub zgoła w dolinie. Mutacja warunkująca, dajmy na to, włochate liście, korzystne, a więc i faworyzowane na dużej wysokości, nie przetrwa w dolinie i zostanie tam wyeliminowana. Rezultat będzie taki sam, jak w przypadku, gdyby zmutowane osobniki przeniosły się do środowiska sprzyjającego dalszym, idącym w tym samym kierunku mutacjom.

Inny przykład: zdolność fruwania pozwala ptakom budować gniazda wysoko na drzewach, gdzie pisklęta są mniej narażone na atak wrogów. Pierwsze, które zaczęły to robić, zyskały przewagę selekcyjną. Z kolei sprzyjało to selekcji osobników lepiej latających wśród piskląt. W taki sposób zdolność fruwania może spowodować zmianę w otoczeniu, czy też w zachowaniu związanym z określonym otoczeniem, co z kolei sprzyja utrwalaniu się tej zdolności.

Najbardziej uderzającą cechą istot żywych jest podział na gatunki – znaczna ich część jest bardzo ściśle wyspecjalizowana, zwłaszcza pod względem pewnych szczególnych umiejętności, od których zależy możliwość przetrwania. Ogród zoologiczny to zwykle wystawa ciekawostek, a byłby on nią w jeszcze większym stopniu, gdyby pozwalał wejrzeć w historię życia owadów. Brak specjalizacji jest czymś wyjątkowym. Z reguły dotyczy ona pewnych wyuczonych zabiegów, „o których nikt by nie pomyślał, gdyby sama natura ich nie wynalazła". Trudno uwierzyć, że ukształtowała je tylko darwinowska „kumulacja przez przypadek". Czy się nam to podoba, czy nie, ma się przemożne wrażenie, że działające siły sprzyjają rozwojowi od tego, co „jasne i proste", ku bardziej złożonemu. Temu, co „jasne i proste", odpowiada, jak się wydaje, niestabilność. Wyjście z owego stanu zdaje się uruchamiać siły

przyśpieszające ten proces. Trudno byłoby go zrozumieć, gdyby rozwój określonego narządu, mechanizmu czy korzystnego zachowania był – jak to często ujmowała u swych początków teoria darwinowska – rezultatem długiego ciągu kolejnych, zupełnie od siebie niezależnych, przypadkowych zdarzeń. Tak dzieje się, jak sądzę, tylko we wstępnym stadium „ukierunkowanego" rozwoju. To on stwarza okoliczności, które – poprzez selekcję – coraz bardziej zdecydowanie kształtują plastyczną materię, umacniając przewagę uzyskaną we wstępnym stadium. Mówiąc metaforycznie, można by powiedzieć: gatunek zorientował się, na czym polega jego życiowa szansa i trzyma się tej drogi.

Pozorny lamarkizm

Spróbujmy zrozumieć i – unikając terminologii animistycznej – powiedzieć w sposób ogólny, jak przypadkowa mutacja, dająca osobnikowi pewną przewagę i sprzyjająca jego przeżyciu w określonym środowisku, przyczynia się do czegoś więcej. Jak mianowicie wzmacnia możliwość pożytecznego jej wykorzystania w taki sposób, jakby koncentrowała na sobie samej selekcyjne oddziaływanie środowiska.

Aby unaocznić ten mechanizm, potraktujmy schematycznie środowisko jako zbiór pomyślnych i niepomyślnych okoliczności. Do pierwszych zaliczymy obecność pożywienia, światła słonecznego i możliwość znalezienia schronienia, do drugich zaś zagrożenia ze strony innych istot żywych (wrogów), trucizny itp. O pierwszych mówić będziemy jako o zabezpieczeniu potrzeb, o drugich zaś jako o zagrożeniach. Nie każda potrzeba może zostać zaspokojona i nie każdego zagrożenia daje się uniknąć. Gatunek, aby przeżyć, musi wykształcić zachowanie, sprzyjające osiąganiu kompromisu, polegającego na jednoczesnym unikaniu najgorszych zagrożeń i zaspokojeniu najpilniejszych potrzeb poprzez wykorzystanie najłatwiej dostępnych zasobów. Korzystna mutacja albo sprawia, że pewne zasoby stają się łatwiej dostępne, albo zmniej-

sza zagrożenia, albo powoduje jedno i drugie. Tym samym zwiększa szansę przeżycia osobników, u których wystąpiła. Zarazem jednak, zmieniając względną wagę potrzeb i zagrożeń, których dotyczy, wyznacza najpomyślniejszy kompromis. Środowisko będzie faworyzować, a więc i selekcjonować te osobniki, które przypadkowo, czy też dzięki własnej inteligencji odpowiednio zmodyfikują swe zachowanie. Modyfikacja ta nie jest przekazywana dziedzicznie następnemu pokoleniu, co jednak nie znaczy, że w ogóle nie jest przekazywana. Najprostszym przykładem może być wspomniany już gatunek rosnących na zboczu kwiatów, wśród których pojawia się mutacja warunkująca włochate liście. Osobniki zmutowane, faworyzowane głównie u szczytu wzgórza tam właśnie rozsiewać będą swe nasiona, tym samym następne ich pokolenie, wzięte jako całość, „zrobi krok w górę", tak jakby „czyniło lepszy użytek z korzystnej mutacji".

Pamiętać przy tym należy, że cała sytuacja ma z reguły charakter dynamiczny, a walka jest bardzo zacięta. W przypadku dość płodnej populacji, która przeżywa, nie zmieniając znacząco swej liczebności, zagrożenia mają zwykle przewagę nad zaspokajaniem potrzeb – przetrwanie osobnika jest czymś wyjątkowym. Co więcej, zagrożenia związane są z zaspokajaniem potrzeb, a pilna potrzeba zaspokojona może być tylko przez stawianie czoła niebezpieczeństwom. (Antylopy na przykład muszą chodzić do wodopoju, ale lwy znają to miejsce równie dobrze jak one). Zagrożenie i zasoby są ściśle ze sobą splecione. Toteż niewielkie choćby ograniczenie znaczenia jednego z zagrożeń w wyniku jakiejś mutacji może dawać znaczącą przewagę tym mutantom, które stawiając czoło jednemu zagrożeniu, unikają przez to innych. W rezultacie selekcja może objąć nie tylko ową cechę dziedziczną, lecz także (przypadkowo lub rozmyślnie) ukształtowaną umiejętność jej wykorzystywania. Potomstwo przejmuje tego rodzaju zachowanie, ucząc się go w najogólniejszym sensie tego słowa. Zmiana sposobu zachowania zwiększa z kolei wartość selekcyjną każdej następnej analogicznie ukierunkowanej mutacji.

Skutek takiego procesu może w znacznym stopniu przypominać rezultaty działania mechanizmu opisanego przez Lamarcka. Aczkolwiek żaden nowy rodzaj zachowania ani żadna związana z nim cecha fizyczna nie są bezpośrednio przekazywane potomstwu, proces ten w istotny sposób zależy od zachowania. Związek przyczynowy jest wszakże raczej odwrotny niż taki, o jakim myślał Lamarck. Nie polega na tym, że zachowanie zmienia cechy fizyczne rodziców, a poprzez dziedziczenie – również potomstwa, lecz na tym, że zmiana cechy fizycznej rodziców modyfikuje – bezpośrednio lub pośrednio, na drodze doboru naturalnego – ich zachowanie, natomiast zmiana zachowania na mocy przykładu, czy też uczenia przekazywana jest potomstwu wraz ze zmienioną cechą fizyczną zapisaną w genomie. Nawet jeśli zmiana cechy fizycznej nie jest dziedziczna, przekaz zmodyfikowanego sposobu zachowania na drodze „uczenia się" może być wysoce skutecznym czynnikiem ewolucyjnym, ponieważ ułatwia uleganie nowym, dziedziczącym się mutacjom, wzmacniając gotowość jak najlepszego ich wykorzystania, a tym samym sprzyjając poddawaniu ich intensywnemu działaniu doboru naturalnego.

Genetyczne utrwalanie zwyczajów i umiejętności

Ktoś może zaoponować, mówiąc, że opisany wyżej proces zdarza się okazjonalnie, ale nie trwa w nieskończoność – nie może więc być podstawowym mechanizmem ewolucji przystosowawczej. Zmiana zachowania nie jest bowiem przekazywana przez substancję dziedziczną – chromosomy. Toteż, po pierwsze, z pewnością nie zostaje ona genetycznie utrwalona i trudno zrozumieć, jak mogłaby wejść w skład odziedziczonego spadku. Problem jest poważny. Wiemy bowiem, że zwyczaje są dziedziczone, świadczy o tym choćby – aby ograniczyć się do ewidentnych przykładów – wicie gniazd przez ptaki czy też różne zabiegi związane z utrzymaniem czystości przez psy i koty. Gdyby darwinizm nie mógł tego wytłumaczyć, musieli-

byśmy go jako teorię porzucić. Kwestia ta ma szczególnie istotne znaczenie w przypadku człowieka, skoro chcemy dojść do wniosku, że dążenia i postępowanie ludzi przyczyniają się do ewolucji naszego gatunku w ściśle biologicznym sensie tego słowa. Moim zdaniem sprawa ma się następująco.

Zgodnie z wcześniejszym założeniem, modyfikacje zachowania zachodzą równolegle ze zmianami cech fizycznych. Najpierw są one konsekwencją przypadkowych mutacji cech, lecz bardzo szybko zaczynają odgrywać decydującą rolę w wyznaczeniu kierunku dalszych mechanizmów selekcyjnych, biegnących kilkoma wybranymi drogami. Dzieje się tak, albowiem skoro tylko nowe zachowanie przynosi choćby rudymentarne korzyści, to w przyszłości jakąkolwiek wartość selekcyjną będą miały wyłącznie dalsze, podobnie ukierunkowane mutacje. W miarę jednak jak nowy (powiedzmy) narząd rozwija się, zachowanie staje się coraz bardziej związane z faktem jego posiadania, staje się z nim nierozłączne. Nie można mieć wprawnych rąk, nie posiłkując się nimi, w przeciwnym razie będą tylko zawadzać (jak amatorowi na scenie, który nie bardzo wie, co z nimi robić). Nie sposób mieć mocnych skrzydeł, nie próbując latać. Nie można mieć modulowanego narządu mowy, nie próbując naśladować dźwięków, jakie docierają z otoczenia. Sztuczne jest odróżnianie i odrębne traktowanie faktu posiadania jakiegoś narządu i skłonności do używania go oraz udoskonalania w praktyce. Pozwala na to wprawdzie abstrakcyjny język, ale abstrakcja ta nie ma żadnego odpowiednika w naturze. Nie powinniśmy, rzecz jasna sądzić, iż samo „zachowanie" zostaje stopniowo zakodowane w strukturze chromosomów i zyskuje tam swoje *loci*. Ale posiadanie określonego narządu zostaje genetycznie utrwalone wraz z umiejętnością jego używania. Dobór nie mógłby skutecznie działać, gdyby „produkując" nowe narządy, nie był wspomagany przez sam posiadający ten narząd organizm, próbujący go jak najlepiej wykorzystać. I fakt ten ma zasadnicze znaczenie. Dzięki temu bowiem oba procesy przebiegają równolegle i zostają w końcu (czy też na każdym stadium) genetycznie utrwalone razem – jako używany narząd, zupełnie jakby rację miał Lamarck.

Pouczające jest zestawienie tego naturalnego procesu z wytwarzaniem narzędzi przez człowieka. Już na pierwszy rzut oka widać, że oba procesy różnią się zasadniczo. Gdybyśmy sporządzając jakiś skomplikowany przyrząd, ciągle próbowali, powodowani niecierpliwością, używać go, zanim zostanie wykonany, najpewniej byśmy go zepsuli. Przyroda, można rzec, postępuje inaczej. Nie potrafi stworzyć nowego organizmu ani jego narządów, jeśli nieustannie ich nie sprawdza, nie używa, nie bada ich skuteczności. Nie jest to jednak dobre porównanie. Wytwarzanie przez człowieka przyrządu odpowiada ontogenezie, to znaczy rozwojowi osobnika od poczęcia do dojrzałości. Tu również żadna ingerencja nie jest pożądana. Młodzi wymagają opieki, nie można ich zmuszać do pracy, nim w pełni nie okrzepną i nie zdobędą właściwych gatunkowi umiejętności. Dobrą analogią do ewolucyjnego rozwoju organizmu może być natomiast historyczna wystawa rowerów bądź samochodów, samolotów, parowozów czy maszyn do pisania, wskazująca jak z roku na rok czy z dziesięciolecia na dziesięciolecie ulegały one stopniowym modyfikacjom. W tym przypadku, podobnie jak w toku procesu przyrodniczego, sprawą zasadniczą jest to, iż do udoskonaleń maszyny wiodło stałe jej używanie; nie znaczy to, że ulegała ona zmianom bezpośrednio wskutek używania; zmiany następowały dzięki gromadzonemu doświadczeniu i wynikającym z nich sugestiom udoskonaleń. *Nota bene* przykład roweru odpowiada wspomnianemu uprzednio przypadkowi gatunku o długiej historii, który osiągnął już maksymalną doskonałość i przestał w zasadzie ulegać dalszym zmianom. A mimo to wcale nie grozi mu wymarcie!

Zagrożenia dla ewolucji intelektu

Powróćmy teraz do początku tego rozdziału. Sformułowaliśmy wtedy pytanie: czy prawdopodobny jest dalszy biologiczny rozwój gatunku ludzkiego? Nasze rozważania doprowadziły, jak sądzę, do wyróżnienia dwóch istotnych kwestii.

Pierwsza dotyczy doniosłego ze względów biologicznych znaczenia zachowań. Choć one same nie są dziedziczne, mogą – pozostając w zgodzie z wrodzonymi zdolnościami oraz ze środowiskiem, a także dostosowując się do zmian zachodzących w samym organizmie, jak i jego otoczeniu – przyspieszać tempo ewolucji o całe rzędy wielkości. Podczas gdy odpowiednie zachowania roślin oraz niższych gatunków królestwa zwierząt kształtują się w wyniku powolnego procesu selekcji, czyli w drodze prób i błędów, rozumność naszego własnego gatunku pozwala nam dokonywać wyborów. Ta nie dająca się przecenić wyższość może stanowić przeciwwagę dla stosunkowo powolnego rozprzestrzeniania się człowieka, dodatkowo hamowanego przez obawę, by nie zabrakło zasobów dla naszego zbyt licznego potomstwa.

Kwestia druga dotyczy pytania, czy prawdopodobny jest dalszy biologiczny rozwój gatunku ludzkiego, i jest ściśle związana z pierwszą. I otóż dochodzimy do wyczerpującej odpowiedzi: zależeć to będzie od nas i od naszego postępowania. Nie wolno nam biernie oczekiwać zdarzeń i sądzić, że są one z góry wyznaczone przez nieuchronne przeznaczenie. Jeśli chcemy mieć przyszłość, musimy ją kształtować; chyba że nam na niej nie zależy. Tak jak rozwoju społecznego i politycznego, a w ogólności wydarzeń historycznych, nie sprowadza nam na głowę jakieś fatum, lecz zależą od naszego postępowania, tak też i o naszej przyszłości biologicznej nie decyduje z góry żadne przeznaczenie, mające wynikać z praw natury. Tak nie jest przynajmniej dla nas, aktorów tej sztuki, nawet jeśli rzecz ma się inaczej w oczach Istoty Najwyższej przyglądającej się nam tak, jak my przyglądamy się losom ptaków i mrówek. Nie jest trudno powiedzieć, dlaczego ludzie traktują swoje dzieje – zarówno biologiczne, jak społeczne – jako z góry wyznaczone przez reguły i prawa, których zmienić nie są władni. Dzieje się tak, ponieważ każdy z osobna czuje, że ma na nie niewielki wpływ, dopóki nie przedstawi swoich opinii wielu innym i nie skłoni ich, aby odpowiednio kierowali swym postępowaniem.

Jeśli chodzi o konkretne zachowania, od których zależy nasza biologiczna przyszłość, wspomnę tylko o jednej kwestii,

o zasadniczym moim zdaniem znaczeniu. Otóż, znaleźliśmy się obecnie w punkcie, w którym grozi nam zgubienie „drogi do doskonałości". Ze wszystkiego, co zostało powiedziane, wynika, że nieuchronnym warunkiem rozwoju biologicznego jest selekcja. Jeśli zostanie całkowicie wyeliminowana, rozwój ulegnie zahamowaniu, a nawet odwróceniu. „Przewaga niekorzystnych mutacji – powiada Julian Huxley – prowadzi do degeneracji narządu, gdy staje się on bezużyteczny i nie podlega już selekcji utrzymującej go na odpowiednim poziomie funkcjonowania".

Otóż sądzę, że coraz intensywniejsza mechanizacja i „ogłupiający charakter" większości procesów wytwórczych pociąga poważne niebezpieczeństwo degeneracji naszego narządu myślenia. Im bardziej o kolejach życia zręcznego robotnika decyduje eliminacja rzemiosła i zastępowanie go przez nudną i nużącą pracę przy taśmie produkcyjnej, tym coraz mniej niezbędne stawać się będą inteligencja, zręczne ręce i wprawne oko. Uprzywilejowany będzie człowiek mało inteligentny, który ze swej natury łatwiej podporządkowuje się nudnej pracy; łatwiej niż komu innemu będzie mu się żyć, stabilizować i wydawać potomstwo. Rezultatem może być wręcz negatywna selekcja talentów i uzdolnień.

Świadomość trudów życia w warunkach nowoczesnej cywilizacji przemysłowej doprowadziła do powołania różnych instytucji, których zadaniem jest obrona robotników przed wyzyskiem i bezrobociem oraz wiele innych działań opiekuńczych. Stały się one bardzo pożyteczne i słusznie uważa się je za niezbędne. Nie możemy jednak przymykać oczu na fakt, że zdejmując z jednostki odpowiedzialność za samą siebie i wyrównując szanse wszystkich ludzi, sprzyjamy eliminacji współzawodnictwa talentów, a tym samym skutecznie hamujemy ewolucję. Zdaję sobie sprawę, że ta właśnie kwestia jest szczególnie kontrowersyjna. Można słusznie dowodzić, że od troski o naszą ewolucyjną przyszłość ważniejsze są starania o dzisiejszą pomyślność. Otóż, jak sądzę, zgodnie z przedstawioną argumentacją, obie sprawy są na szczęście wzajemnie związane. Obok ubóstwa najgorszą plagą naszego życia stała się nu-

da. Zamiast godzić się na to, by dzięki technice, jaką wymyśliliśmy, powstawało coraz więcej zupełnie niepotrzebnego luksusu, powinniśmy tak ją doskonalić, by uwalniała ludzi od wszelkich czynności mechanicznych, nie wymagających od nich żadnej inteligencji. To nie człowiek, jak to się często zdarza, powinien zastępować maszynę, gdy ta jest zbyt droga, lecz maszyna winna przejąć zadania, do których szkoda człowieka. Produkcja nie stanie się od tego tańsza, ale ci, którzy są w nią zaangażowani, będą szczęśliwsi. Tak długo, póki na świecie przeważa konkurencja między wielkimi firmami i koncernami, nadzieja na ruch w tym kierunku jest niewielka. Konkurencja ta jest jednak równie mało interesująca, co biologicznie bezwartościowa. Naszym celem powinno być wprowadzenie na jej miejsce interesującego i inteligentnego współzawodnictwa między poszczególnymi ludźmi.